

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EL ESTUDIO DE
ESTRATEGIAS DE CONTROL APLICADAS A LA VENTILACIÓN EN LA
MINERÍA SUBTERRÁNEA**

JUAN DIEGO NOVA MOJICA
MARLON MAURICIO MORENO RINCON

Monografía

Ing. JUAN MAURICIO SALAMANCA, PhD

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
SOGAMOSO

2015

DEDICATORIA

Agradecemos en primer lugar a Dios quien nos dio la vida y la ha llenado de bendiciones, a él que con su infinito amor nos ha dado la sabiduría suficiente para culminar nuestra ingeniería. Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento, reconocimiento y cariño a nuestros padres por todo el esfuerzo que hicieron para darnos una profesión y hacer de nosotros personas de bien, gracias por los sacrificios y la paciencia que demostraron todos estos años; gracias a ustedes hemos llegado a donde estamos. Gracias a todas aquellas personas que de una u otra forma nos ayudaron a crecer como personas y como profesionales. Agradecemos también de manera especial a nuestro director de tesis Doctor Juan Mauricio Salamanca quién con sus conocimientos y apoyo supo guiar el desarrollo de la presente tesis desde el inicio hasta su culminación. “Ahora podemos decir que todo lo que somos es gracias a todos ustedes”

“La innovación es lo que distingue a un líder de los demás”

Steve Jobs (1955-2011)

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	7
CAPITULO 1: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	9
1.1 REQUISITOS PARA EL DISEÑO	9
1.2 VENTILACIÓN	9
1.3 DISEÑO	10
1.4 ESPECIFICACIONES TECNICAS DE COMPONENTES ELECTRONICOS	11
1.5 SENSOR DE GAS MQ2.....	11
1.6 SENSOR DE PRESIÓN BMP085	12
1.7 VENTILADOR RADIAL Y VENTILADOR AXIAL (ACTUADORES)	12
1.8 TARJETA DE DESARROLLO BEAGLEBONE	13
1.9 TARJETA DE DESARROLLO PINGÜINO	14
1.10 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	14
1.11 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO	15
CAPITULO 2: MODELADO.....	17
2.1 CARACTERISTICAS DEL MODELADO	17
2.2 ECUACIÓN DE NAVIER STOKES Y LEYES DE KIRCHHOFF'S	17
2.3 ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA LA DISOLUCIÓN DE GASES.....	18
2.4 ANALISIS DE RED DE VENTILACIÓN DEL PROTOTIPO	19
2.5 LINEALIZACION.....	22
2.6 SIMULACIÓN DE RED DE VENTILACION	25
CAPITULO 3: ESTIMACIÓN DE PARAMETROS Y CONTROLADORES.....	28
3.1 ESTIMACIÓN DE PARAMETROS.....	28
3.2 TERMINOLOGIA USADA PARA LA ESTIMACIÓN DE PARAMETROS	28
3.3 ALGORITMO DE MINIMOS CUADRADOS	29
3.4 ANALISIS Y DISEÑO DE CONTROLADORES	30
3.5 CONTROLADOR MUERTE SUBITA (DEAD-BEAT).....	31
3.6 CONTROLADOR POR ASIGNACIÓN DE POLOS.....	32
3.7 SIMULACIÓN DE SISTEMA CONTROLADOR.....	34
CAPITULO 4: IMPLEMENTACÓN.....	37
4.1 REQUERIMIENTOS.....	37

4.2 CALCULO DE FLUJOS	37
4.3 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA.....	38
4.4 DISEÑO DE INTERFAZ GRAFICA	38
4.5 ALGORITMOS DE DETERMINACIÓN DE PARAMETROS	40
4.6 ALGORITMOS DE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES	44
CAPITULO 5: PRUEBAS Y VALIDACION	45
5.1 CONSIDERACION DE PERTURBACIONES	45
5.2 CARACTERIZACION DE VENTILADORES.....	46
5.3 RESPUESTA EN PUNTO DE EQUILIBRIO SIN CONTROL.....	49
5.4 CONTROLADOR POR ASIGNACION DE POLOS.....	53
5.5 CONTROLADOR MUERTE SUBITA (DEAD-BEAT).....	60
5.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	67
CONCLUSIONES.....	69
ANEXOS	71
.....	72
REFERENCIAS.....	72

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Plano del prototipo, medidas y ubicación de componentes (sensores actuadores)</i>	10
<i>Figura 2. Sensor de gas MQ2</i>	11
<i>Figura 3. Sensor de presión y temperatura BMP085</i>	12
<i>Figura 4. Izq: ventilador radial, Der: ventilador axial}</i>	12
<i>Figura 5. Tarjeta de desarrollo BeagleBone</i>	13
<i>Figura 6. Tarjeta de desarrollo Pingüino 18f26j50</i>	14
<i>Figura 7. Vista 3D del prototipo</i>	14
<i>Figura 8. Vista del prototipo real con actuadores y sensores</i>	15
<i>Figura 9. Vista 3D del circuito de interconexión</i>	16
<i>Figura 10. Ubicación de flujos del prototipo</i>	19
<i>Figura 11. Trayectoria de flujos</i>	20
<i>Figura 12. Diagrama de bloques de la representación no lineal del prototipo</i>	26
<i>Figura 13. Comportamiento de los flujos en el prototipo</i>	27
<i>Figura 14. Comportamiento de los gases en el prototipo</i>	27
<i>Figura 15. Estructura general de controlador de muerte súbita</i>	31
<i>Figura 16. Estructura general de controlador de ubicación de polos</i>	33
<i>Figura 17. Izq: Diagrama de la planta con control, Der: Diagrama de la planta sin control</i>	34
<i>Figura 18. Resultado de la simulación: (a) Respuesta sin control, (b) Señal de control, (c) Respuesta con control</i>	35
<i>Figura 19. Resultado de la simulación: (a) Respuesta sin control, (b) Señal de control, (c) Respuesta con control</i>	36
<i>Figura 20. Esquema de funcionamiento del programa</i>	38
<i>Figura 21. Ventana principal de la interfaz</i>	39
<i>Figura 22. Segunda venta de la interfaz</i>	39
<i>Figura 23. Diagrama de flujo para el algoritmo de mínimos cuadrados</i>	40
<i>Figura 24. Diagrama de bloques prueba de algoritmo</i>	41
<i>Figura 25. Señal de excitación</i>	41
<i>Figura 26. Respuesta del sistema a la señal de excitación</i>	42
<i>Figura 27. Comportamiento del algoritmo en Simulink</i>	42
<i>Figura 28. Comportamiento del algoritmo en python</i>	43
<i>Figura 29. Diagrama de implementación práctica de los estimadores</i>	43
<i>Figura 30. Estructura práctica de las estrategias de control</i>	44
<i>Figura 31. Presiones al inyectar humo blanco</i>	45
<i>Figura 32. Presiones al inyectar gas butano</i>	46
<i>Figura 33. Curva de transferencia de M1</i>	46
<i>Figura 34. Curva de transferencia de M2</i>	47
<i>Figura 35. Curva de transferencia de M3</i>	47
<i>Figura 36. Relación entre ciclo útil del PWM vs voltaje aplicado a M2</i>	48
<i>Figura 37. Relación entre ciclo útil del PWM vs voltaje aplicado a M3</i>	48
<i>Figura 38. Señales de control en punto de equilibrio</i>	49
<i>Figura 39. Comportamiento de los flujos de aire en el punto de equilibrio</i>	50
<i>Figura 40. Parámetros del sistema Rama 1</i>	50
<i>Figura 41. Parámetros del sistema Rama 2</i>	51

<i>Figura 42. Comportamiento de las presiones en el punto de equilibrio</i>	<i>51</i>
<i>Figura 43. Dinámica de gases ante perturbación por frente izquierdo</i>	<i>52</i>
<i>Figura 44. Dinámica de gases ante perturbación por frente central.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 45. Dinámica de gases ante perturbación por frente izquierdo</i>	<i>54</i>
<i>Figura 46. Señales de control para perturbaciones por frente izquierdo</i>	<i>54</i>
<i>Figura 47. Comportamiento de los flujos</i>	<i>55</i>
<i>Figura 48. Parámetros del sistema en G1</i>	<i>55</i>
<i>Figura 49. Parámetros del sistema en G2</i>	<i>56</i>
<i>Figura 50. Parámetros del sistema en G3</i>	<i>56</i>
<i>Figura 51. Dinámica de gases ante perturbación por frente central.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 52. Señales de control para perturbaciones por frente central.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 53. Comportamiento de los flujos</i>	<i>58</i>
<i>Figura 54. Parámetros del sistema en G1</i>	<i>59</i>
<i>Figura 55. Parámetros del sistema en G2</i>	<i>59</i>
<i>Figura 56. Parámetros del sistema en G3</i>	<i>60</i>
<i>Figura 57. Dinámica de gases ante perturbación por frente izquierdo</i>	<i>61</i>
<i>Figura 58. Señales de control para perturbaciones por frente izquierdo</i>	<i>61</i>
<i>Figura 59. Comportamiento de los flujos</i>	<i>62</i>
<i>Figura 60. Parámetros del sistema en G1</i>	<i>62</i>
<i>Figura 61. Parámetros del sistema en G2</i>	<i>63</i>
<i>Figura 62. Parámetros del sistema en G3</i>	<i>63</i>
<i>Figura 63. Dinámica de gases ante perturbación por frente central.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 64. Señales de control para perturbaciones por frente central.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 65. Comportamiento de los flujos</i>	<i>65</i>
<i>Figura 66. Parámetros del sistema en G1</i>	<i>66</i>
<i>Figura 67. Parámetros del sistema en G2</i>	<i>66</i>
<i>Figura 68. Parámetros del sistema en G3</i>	<i>67</i>

INTRODUCCIÓN

La necesidad del hombre por usar los minerales que se encuentran en la tierra para un uso específico nace desde hace mucho tiempo. La explotación de minerales o recursos no renovables como el caso del carbón se realiza a nivel mundial con el fin de usarlo principalmente en la generación de energía eléctrica. En la actualidad, los países que más presentan reservas de carbón son EE.UU, Rusia, China y Australia entre otros [1]; pero cabe destacar que son reservas que se están consumiendo o explotando de manera acelerada por la demanda, las técnicas y la tecnología implementada para la extracción del mineral.

En Colombia, la explotación de carbón se realiza en su mayoría de una manera artesanal, sin tener en cuenta la normatividad [2] [3], técnicas de explotación y precauciones al realizar esta labor; por lo cual se observa alto índice de accidentalidad, baja productividad y pérdidas económicas que afectan la región.

De acuerdo con [4], uno de los temas más importantes a tratar en cuanto a seguridad industrial en la explotación de carbón subterránea, está relacionado con la inadecuada implementación de los circuitos de ventilación que permiten mantener una evacuación constante de los gases (como el gas metano) para garantizar un nivel mínimo de los mismos. En la explotación subterránea se contemplan múltiples sistemas de ventilación, de las más usadas son la ventilación forzada y natural. La ventilación natural hace uso de la red de túneles de la mina para la distribución del aire; el sistema forzado emplea el sistemas de túneles exclusivos por los que circula el aire fresco y es distribuidos por los ventiladores de refuerzo que lo hacen llegar a los frentes de trabajo, el aire viciado se expulsa ya sea por túneles especiales o de transporte [5] [6].

La posibilidad de tener un sistema de ventilación continua e independiente de los factores climáticos, hace de la ventilación forzada una mejor opción por permitir trabajo continuo dentro la mina. En su contra juega el alto consumo de energía que se necesita para su funcionamiento [7], consumo que se puede reducir al implementar sistemas VSD (*variable speed drive*) [7]. Una de las formas para diseñar estos sistemas es recurrir a técnicas de control en las que se debe conocer el comportamiento y sus características deseadas [2].

El comportamiento se obtiene a partir del modelado del sistema de ventilación forzada, para el que se debe tener en cuenta las características de los

ventiladores y todos los túneles que conforman la mina, ya que estos se modelan como ductos por los que fluye un gas incomprensible utilizando las ecuaciones de Navier- Stokes [4]. Todos los flujos de los túneles están determinados por las leyes de kirchhoff's para cumplir la ley de conservación de la masa [4].

Al desarrollar el modelado teóricamente se debe tener claro que su aplicación real puede variar con el crecimiento de la mina a lo largo del tiempo, razón por la cual en [8] los autores propone usar la simulación de crecimiento de árbol; método sencillo, eficaz y adaptable que se centra en la rama de mayor crecimiento y profundidad como modelo principal.

La identificación del problema se basa en el estudio de sistemas de ventilación subterránea en minas, los cuales contemplan variables como el cálculo de caudales de aire necesarios para el bienestar y la salud de los trabajadores, que se ven afectados por la humedad, temperatura y concentración de gases en el lugar de trabajo. La acumulación de gases en las minas es uno de los factores de más alto riesgo, por la característica del mineral (carbón), este emanan micro partículas y gases (tóxicos, explosivos), aumentando la accidentalidad [3].

El modelado del sistema de ventilación entrega los datos de los flujos y tiempos de licuado de gases, usados para mejorar el circuito de ventilación existente y la técnica de control implementada en la tecnología VSD [7].

El objetivo principal de este proyecto es construir un prototipo en madera basado en la forma de una mina real, para simular un circuito de ventilación forzada que permita la observación del comportamiento del sistema, ante perturbaciones a partir de la inyección de gas de forma controlada y de esta manera generar estrategias de control para aplicar en la tecnología VSD [7]. El prototipo contará con sensores de gas (butano), sensores de presión (estimación de flujos) y ventiladores para genera los diferentes flujos.

CAPITULO 1: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se encuentra todo lo relacionado con el diseño, descripción de componentes y construcción del prototipo, en el cual se desarrollaran las pruebas de las diferentes estrategias de control y validación del modelado. Iniciando de información referente a la explotación de minas de carbón [3], se elabora el plano del prototipo en el que se determina la ubicación de sensores y actuadores.

1.1 REQUISITOS PARA EL DISEÑO

El diseño del prototipo se lleva acabo de un estudio a fondo de cómo se realiza la explotación de carbón en Colombia [3], normatividad y técnicas llevadas a cabo [2]. Técnicas donde las minas cuentan con un túnel de transporte, vías de explotación (guías o sobre guías), tambores y túneles de evacuación de gas viciado.

No siendo suficiente la ventilación natural, se instalan ventiladores auxiliares y extractores que cierran el circuito de ventilación forzada, mejorado la velocidad de licuado de los gases presentes en la explotación y que afectan la salud del personal. Con el objetivo de reducir el riesgo generado por los gases se sensa y se verifica la calidad del oxígeno.

Las múltiples ventajas y desventajas son analizadas para determinar si es pertinente preservarlas en el diseño final del prototipo con el objetivo que este asimile las características de la mayoría de títulos mineros existentes en la región y que funcionan dentro de un nivel aceptable de seguridad industrial.

1.2 VENTILACIÓN

Los riesgos de la extracción subterránea se elevan cuando no se dispone de la adecuada ventilación o se ignora las disposiciones comunes contempladas en el decreto 1335 de 1987 [3] y normas técnicas.

En Colombia el decreto 1335 de 1987, ofrece las herramientas legales y técnicas en el trabajo subterráneo, en [2] se resumen los artículos con indicaciones técnicas, herramientas de monitoreo y control continuo.

En [3] expone que en cualquier atmósfera de trabajo en bajo tierra, con una jornada de ocho horas de trabajo, el Valor Límite Permisible (VLP) para los siguientes gases contaminantes:

1.4 ESPECIFICACIONES TECNICAS DE COMPONENTES ELECTRONICOS

Las características técnicas de los dispositivos es una de las limitaciones más fuerte al desarrollar una alternativa de monitoreo y control en el prototipo. Los componentes se seleccionan para poder funcionar como un solo sistema facilitando la implementación de diferentes soluciones sin realizar cambios al hardware del prototipo.

Los cambios que se realizaron para cada solución se desarrollaron a nivel de software, porque se reduce el tiempo necesario en la implementación de cada uno de estos. El software seleccionado como herramienta de trabajo debe ser versátil y tener una velocidad de ejecución alta en plataforma seleccionada, las tarjetas de desarrollo son una excelente opción al ofrecer soporte a múltiples lenguajes de programación y se reduce el tiempo de construcción.

La selección de sensores se realizó por prestaciones, facilidad de compra, comunicación, conexión y compatibilidad con las tarjetas de desarrollo. La selección de los componentes darán las características eléctricas y funcionales del circuito impreso, diseñado como fuente de recepción, transmisión y generación de las múltiples señales necesaria para cada estrategia de control.

1.5 SENSOR DE GAS MQ2



Figura 2. Sensor de gas MQ2

El módulo sensor (MQ2) (Figura 2) se utiliza en la detección de fugas de gas de equipos en los mercados de consumo y la industria. Es adecuado para la detección de GLP, butano, propano, metano, alcohol, hidrógeno [11].

Características:

- Alimentación: 5V
- Tipo de interfaz: Analógico y digital.
- Pin Definición: 1-AOUT, 2-GND, 3-VCC, 4-DOUT
- Amplio alcance de detección.
- Respuesta rápida y alta sensibilidad ajustable por potenciómetro.

1.6 SENSOR DE PRESIÓN BMP085

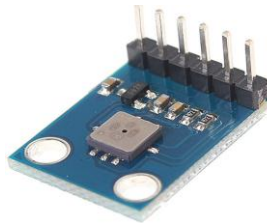


Figura 3. Sensor de presión y temperatura BMP085

El sensor BMP085 (Figura 3) entrega lecturas de presión atmosférica y temperatura en formato digital a través del bus I2C. La lectura de presión está determinada por la altura a nivel del mar donde se encuentre el sensor [12].

Características

- Voltaje de operación: 3 a 5V
- Rango de operación: 300-1100 hPa (9000m a -500m sobre el nivel del mar)
- Hasta 0.03 hPa/0.25m de resolución
- Temperatura de operación: -4 a +85°C
- Precisión en medida de temperatura: +-2°C

1.7 VENTILADOR RADIAL Y VENTILADOR AXIAL (ACTUADORES)



Figura 4. Izq: ventilador radial, Der: ventilador axial}

Características:

Voltaje de alimentación: 12v.

Corriente: 1.2A

Estas son las principales características de los ventiladores (Figura 4) tomadas de sus hojas de especificaciones donde se encuentran todos sus detalles [13] [10] [14].

1.8 TARJETA DE DESARROLLO BEAGLEBONE

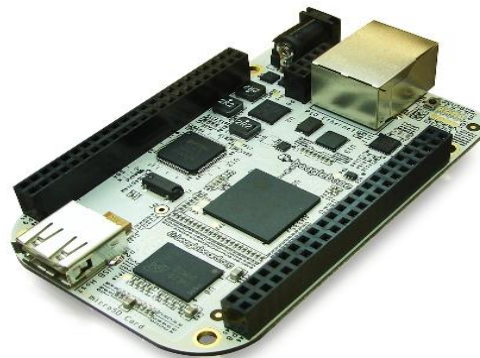


Figura 5. Tarjeta de desarrollo BeagleBone

La BEAGLEBONE (Figura 5) es la última adición a la familia BeagleBoard.org y como sus predecesores, está diseñado para el uso de la comunidad Open Source. Esta tecnología es una de las primeras en implementar el uso de un procesador ARM cortex A8 de bajo costo acompañado de un conjunto mínimo de características, para que el usuario pueda experimentar el poder del procesador sin configuraciones externas a la tarjeta.

Posee conectores de uso común en los computadores modernos, permitiendo conexión con periféricos comerciales para mejorar sus prestaciones y 46x2 pines de uso general, que permiten uso del hardware especial que compone su chip embebido. Esta tarjeta de desarrollo se usara para la generación de señales de control y la transmisión de los datos a un computador para su procesamiento [15].

Sus principales características son:

- 700Mhz Super-escalar ARM Cortex-A8.
- 256MB RAM DDR2.
- 1 puerto USB 2.0 host.
- 10/100 Ethernet.
- MicroSD slot.
- USB a Serial/JTAG.
- 2 puertos I2C.
- 8 salidas PWM.

1.9 TARJETA DE DESARROLLO PINGÜINO

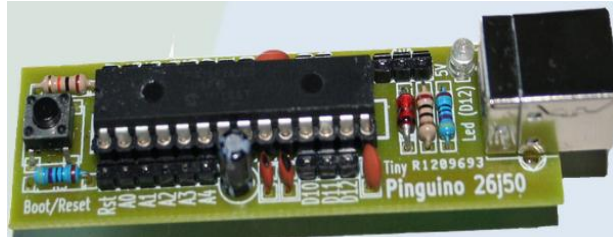


Figura 6. Tarjeta de desarrollo Pingüino 18f26j50

La tarjeta Pingüino (Figura 6) usada tiene como núcleo principal un microcontrolador 18F2550, sobre el cual se carga un *bootloader* que facilita la reprogramación del microcontrolador usando diferentes plataformas de desarrollo. Esta tarjeta se usó para la digitalización y transmisión de las señales analógicas de los sensores de gas (Figura 2) a la tarjeta Beaglebone [16] [17].

1.10 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

Con el plano diseñado se procede a la construcción del prototipo usando materiales de fácil adquisición y manipulación. La madera cumple los parámetros deseados para tres de las caras de los ductos, ofreciendo robustez al prototipo. La última cara (superior) de los ductos se cubrió usando acrílico translúcido con el objetivo de poder observar el interior del prototipo y tener percepción visual de lo que ocurre en su interior.

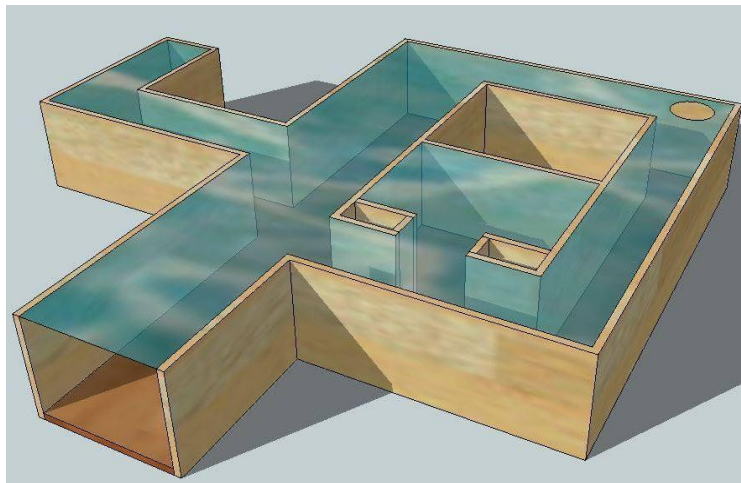


Figura 7. Vista 3D del prototipo

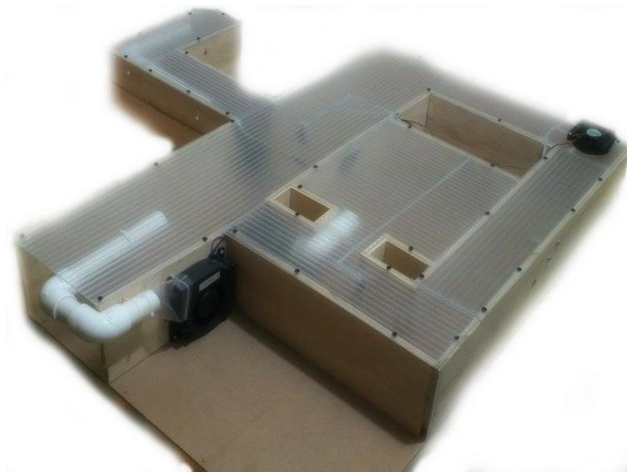


Figura 8. Vista del prototipo real con actuadores y sensores

En la Figura 7 se visualiza la concepción del prototipo antes de su construcción, esta visualización facilita el entendimiento del plano para su construcción y en la Figura 8 se observa el prototipo terminado, con características similares a las del diseño de la Figura 7.

1.11 CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO

La interacción de los múltiples componentes electrónicos como un solo sistema se logra con el desarrollo de un circuito que integra una etapa de potencia, acople de señal de control, multiplexación de canal I2C para los sensores de presión y de muestreo.

Cada etapa del circuito está diseñada de forma independiente con el objetivo de reducir la propagación de daños en casos de un mal funcionamiento y la identificación de fallas de manera estratégica.

En la etapa de potencia se ubican todos los componentes para controlar la velocidad de cada ventilador del montaje, por la diferencia de los niveles de voltaje de las señales de control y la de trabajo de la etapa potencia se implementa una circuito de acople que iguale los niveles de voltaje del PWM y desacople la etapa de potencia de la fuente de las señales de control.

La diferencia en número de sensores de presión y canales de comunicación I2C se soluciona realizando una multiplexación del único canal funcional disponible en la tarjeta de desarrollo Beaglebone y la última etapa se implementó para mejorar la resolución de las muestra de los sensores de gas,

todo esto se muestra en el esquemático que se encuentra en Anexos y la Figura 9 es la vista 3D del PCB.

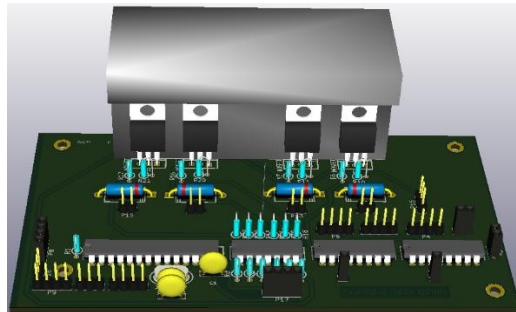


Figura 9. Vista 3D del circuito de interconexión

De esta manera se da por terminada la construcción del prototipo con todos los componentes necesarios (sensores, actuadores y circuito de control), para implementar y evaluar el funcionamiento de los controladores a diseñar.

CAPITULO 2: MODELADO

En este capítulo se hace un estudio del circuito de ventilación del prototipo usando una aproximación de parámetros de las ecuaciones incompresibles de Navier- Stokes, leyes de kirchhoff's [4] y la ecuación diferencial para la disolución de los gases [2], elementales para la simulación y el diseño de las estrategias de control.

2.1 CARACTERISTICAS DEL MODELADO

El modelado se realiza de forma general para cada ecuación, donde solo se desea conocer el orden del sistema que representan y los nombres de los parámetros de las ecuaciones sin necesidad de calcularlos. Procedimiento necesario para la implementación de algoritmos de estimación de parámetros en tiempo real.

2.2 ECUACIÓN DE NAVIER STOKES Y LEYES DE KIRCHHOFF'S

El flujo de aire en una rama comprendida entre dos puntos Pl_{j0} y Pl_j , se describe como un modelo de primer orden usando aproximación de parámetros de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes [4] mostrada en la ecuación (1).

$$\frac{dQ_j}{dt} + K_j R_j |Q_j| Q_j = K_j H_j \quad (1)$$

Dónde:

Q_j Flujo de la rama j de la mina (m^3/s).

R_j Resistencia aerodinamica (Kg/m^7).

K_j Coeficiente de inercia (Kg/m^4).

H_j Diferencia de presiones de la rama (psi).

$$R_j = r_j L_j$$

r_j Resistencia aerodinamica especifica.

L_j Longitud de la rama

$$K_j = \frac{S_j}{\rho L_j}$$

S_j Area transversal de la rama.

ρ Densidad del aire.

$$H = Pl_{j0} - Pl_j$$

Pl_{j0} Presion absoluta en el inicio de la rama.

Pl_j Presion absoluta en el final de la rama.

Para el modelado se considera el aire como un gas incompresible y la temperatura constante en toda la rama [4], al igual la ley de la conservación de la masa en los diferentes nodos del prototipo, analizados usando analogías de análisis de circuitos eléctricos.

Las analogías se aplican a las leyes de Kirchhoff's, para determinar volumen y presión de aire en cada nodo y analizar la interacción de los flujos de la red ventilación [4]. Para el análisis general se consideran los caudales como corrientes y las presiones como voltajes.

- Ley de corriente de Kirchhoff (LCK): la suma algebraica de las corrientes hacia un nodo es cero en todo instante [18].
- Ley de voltaje de Kirchhoff (LVK): la suma algebraica de los voltajes alrededor de cualquier trayectoria cerrada es cero en todo instante [18].

2.3 ECUACIÓN DIFERENCIAL PARA LA DISOLUCIÓN DE GASES

El flujo de aire requerido para diluir los gases que se producen en la explotación en un frente de trabajo, se relaciona con la concentración del gas y volumen del frente de trabajo [2].

$$\frac{dk}{dt} = \text{Rapidez con que entra el gas} - \text{Rapidez con que sale el gas} \quad (2)$$

$$\frac{dk}{dt} = Q_1 \cdot c_1 - Q_2 \cdot c_2; \quad c = \frac{K(t)}{V_0} \quad (3)$$

Dónde:

c_1 Concentracion inicial de los gases.

c_2 Concentracion final de los gases.

c Concentracion de los gases de la explosion (%).

$K(t)$ Volumen del gas en el tiempo.

V_0 Volumen de la galería (m^3).

Ecuación diferencial de la representación dinámica de los gases:

$$\frac{dk}{dt} = -Q \cdot \frac{K(t)}{V_0} \quad (4)$$

La ecuación (4) representa la dinámica de la concentración de gas es un sistema de primer orden descendente, en función del volumen y el flujo de aire aplicado en el frente de trabajo que se modela.

2.4 ANALISIS DE RED DE VENTILACIÓN DEL PROTOTIPO

El modelado del prototipo se realiza sobre algunas partes que definen claramente alguno de los sistemas expuestos anteriormente, generando modelos independientes; uno de la red de ventilación y otro de la concentración de gases.

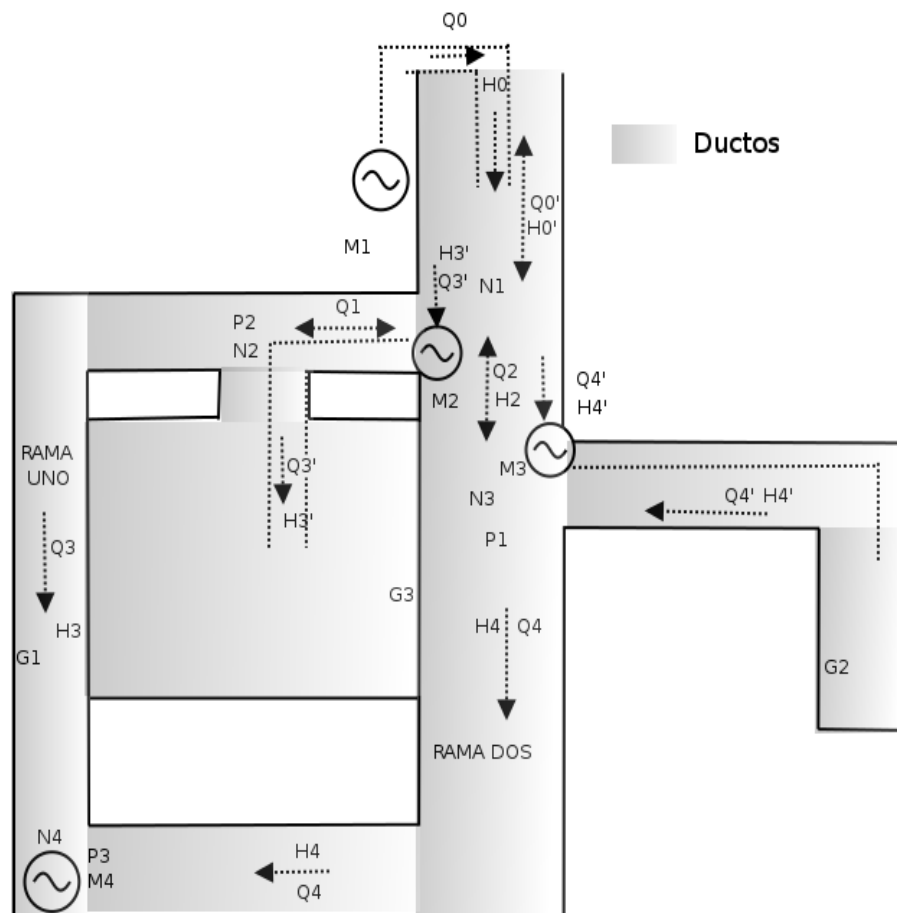


Figura 10. Ubicación de flujos del prototipo

Dónde:

M1 Ventilador radial principal, punto de trabajo fijo.

M4 Ventilador axial, punto de trabajo fijo.

M2 Ventilador radial para frente de trabajo central. Actuador.

M3 Ventilador radial para frente de trabajo derecho. Actuador.

P1, P2, P3 Sensores de presión.

G1, G2, G3 Sensores de gas.

N1, N2, N3, N4 Nodos.

Q0 Flujo ingresado por el ventilador radial principal.

Q0' Flujo natural.

Q3' Flujo de aire absorbido por el ventilador radial M2.

Q4' Flujo de aire absorbido por el ventilador radial M3.

Q2 y Q1 Flujos que deben cumplir la ley de la conservación de la masa.

Q3 Flujo por la rama 1.

Q4 Flujo por la rama 2.

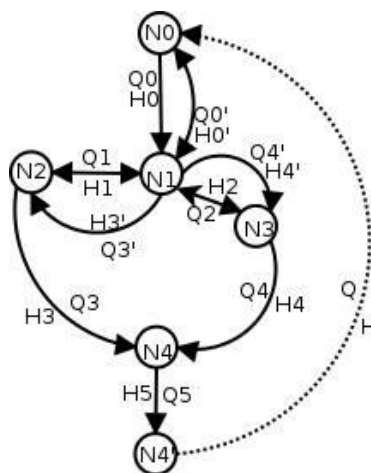


Figura 11. Trayectoria de flujos

En la Figura 10 se observan los sentidos de flujos asumidos, ubicación de nodos y puntos críticos donde se simula la presencia de gases en los frentes de trabajo y la Figura 11 es la representación topológica del circuito de ventilación usado para llevar a cabo el modelado de los sistemas del circuito.

En el primer estudio, se hace el modelado de la red de ventilación, en la que se trabajan los flujos de aire sobre las ramas de manera independiente al modelado de los gases en los frentes de trabajo y se relacionan con la ley de Kirchhoff's.

$$\frac{dQ_3}{dt} + K_3 R_3 |Q_3| Q_3 = K_3 H_3 \quad (5)$$

$$\frac{dQ_4}{dt} + K_4 R_4 |Q_4| Q_4 = K_4 H_4 \quad (6)$$

Donde Q_3 es el flujo de aire sobre la rama uno y Q_4 es el flujo sobre la rama dos, las ecuaciones (5) y (6) son la dinámica de cada flujo respectivamente. H_3 y H_4 son los diferenciales de presiones para cada rama, los demás términos son valores representativos de cada sistema.

En los diferentes nodos del prototipo como lo indica la Figura 11, se aplica las leyes de Kirchhoff para poder determinar los flujos que no se estiman directamente.

Análisis en nodo 1

$$Q_0 + Q'_0 + Q'_3 + Q'_4 + Q_2 + Q_1 = 0 \quad (7)$$

Análisis en nodo 2

$$Q_1 + Q'_3 + Q_3 = 0 \quad (8)$$

Análisis en nodo 3

$$Q_4 + Q'_4 + Q_2 = 0 \quad (9)$$

Análisis en nodo 4

$$Q_3 + Q_4 = Q_5 \quad (10)$$

En el modelo están presentes tres flujos a los cuales no se puede especificar el sentido, para intentar definir el sentido de estos flujos se realiza unas suposiciones a partir de los flujos conocidos.

$Q_3 + Q_4 = Q_5 = Q_0 + Q'_0$ Ley de la conservación de las masas.

$Q'_0 = Q_3 + Q_4 - Q_0$ Ecuación para estimar el flujo de entrada natural, el sentido de este es entrando si la respuesta es positiva.

El sentido del flujo es saliendo si la respuesta es negativa.

$Q_2 = Q_4 + (-Q'_4)$ Se estima el flujo y el sentido de Q_2 .

El flujo sale del nodo 3 hacia el nodo 1 si es negativo.

El flujo entra al nodo 3 si el resultado es positivo.

$Q_1 = Q_3 + (-Q'_3)$ Se estima el flujo y el sentido de Q_1 .

El flujo sale del nodo 2 hacia el nodo 1 si es negativo.

El flujo entra al nodo 2 si el resultado es positivo.

El segundo estudio se centra en el modelado de la concentración de gases en los frentes de trabajo y una rama.

$$\frac{dG_3}{dt} = -Q'_3 \cdot \frac{G_3(t)}{V_3}; \quad (11) \quad \frac{dG_2}{dt} = -Q'_4 \cdot \frac{G_2(t)}{V_2}; \quad (12) \quad \frac{dG_1}{dt} = -Q_3 \cdot \frac{G_1(t)}{V_1} \quad (13)$$

Donde (11) (12) y (13) son las ecuaciones de las dinámicas de gas para la concentración de gases detectada por los sensores G_3, G_2 y G_1 respectivamente, los Q son los flujos de aire y V representa el volumen donde se encuentra presencia de gas.

2.5 LINEALIZACION

Obtener una representación o aproximación lineal de sistemas no lineales permite comprender el comportamiento del sistema no lineal antes perturbaciones alrededor de un punto de operación.

La representación lineal se obtiene usando la representación aproximada por series de Taylor (14) de la función no lineal como lo explica [19].

$$\dot{x}(t) = F(w_0) + \left. \frac{df}{dw} \right|_{w=w_0} (w - w_0) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2f}{dw^2} \right|_{w=w_0} (w - w_0)^2 + \dots \quad (14)$$

El punto de equilibrio o de reposo del sistema se obtiene igualando la función no lineal a cero $\dot{x}(t) = 0$. El prototipo tiene dos sistemas no lineales diferentes, uno de los modelos depende del comportamiento del otro.

$$w - w_0 = \begin{pmatrix} Q(t) - Q_0 \\ H(t) - H_0 \\ G(t) - G_0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\frac{df}{dw} = \left\{ \frac{df}{dQ} \quad \frac{df}{dH} \quad \frac{df}{dG} \right\} \quad (16)$$

$$Q_3(Q_3, H_3) = -K_3 R_3 |Q_3| Q_3 + K_3 H_3 \quad (17)$$

$$Q_4(Q_4, H_4) = -K_4 R_4 |Q_4| Q_4 + K_4 H_4 \quad (18)$$

$$G_3(G_3, Q'_3) = -Q'_3 \frac{G_3(t)}{V_3} \quad (19)$$

$$G_2(G_2, Q'_4) = -Q'_4 \frac{G_2(t)}{V_2} \quad (20)$$

$$G_1(G_1, Q_3) = -Q_3 \frac{G_1(t)}{V_1} \quad (21)$$

Las ecuaciones (17), (18), (19), (20) y (21) son las representaciones no lineales de los sistemas del prototipo. Los puntos de equilibrio se calculan igualando cada sistema no lineal a cero.

$$-K_3 R_3 |Q_3| Q_3 + K_3 H_3 = 0 \quad (22)$$

$$-K_4 R_4 |Q_4| Q_4 + K_4 H_4 = 0 \quad (23)$$

$$R_3 |Q_3| Q_3 = H_{30} \quad (24)$$

$$R_4 |Q_4| Q_4 = H_{40} \quad (25)$$

$$-Q'_3 \frac{G_3}{V_3} = 0 \quad (26)$$

$$-Q'_4 \frac{G_2}{V_2} = 0 \quad (27)$$

$$-Q_3 \frac{G_1}{V_1} = 0 \quad (28)$$

El punto de equilibrio para el sistema de gases (G_0) se ubica a la concentración del gas el cual desea igual a cero y Q_0 puede tomar cualquier valor diferente de cero.

Se realizan las derivadas parciales sobre las ecuaciones (5) y (6) para obtener las funciones lineales de los sistemas de cada rama (29) y (30), como lo explica el autor [19].

$$\frac{dQ_3}{dt} = -2K_3R_3|Q_3|\Big|_{Q_3=Q_{30}}(Q_3 - Q_{30}) + K_3|H_3=H_{30}}(H_3 - H_{30}) \quad Q_{30} = 0.5S_3 \quad (29)$$

$$\frac{dQ_4}{dt} = -2K_4R_4|Q_4|\Big|_{Q_4=Q_{40}}(Q_4 - Q_{40}) + K_4|H_4=H_{40}}(H_4 - H_{40}) \quad Q_{40} = 0.5S_4 \quad (30)$$

Las variables Q_{30} y Q_{40} son los flujos en el punto de trabajo y se calculan a partir de la velocidad mínima que debe tener el aire y el área transversal en cada rama [2]. Se evalúan las ecuaciones (29) y (30) para el punto de trabajo y se obtiene la linealización para cada rama (31) y (32).

$$\frac{dQ_3}{dt} = -2K_3R_3|Q_{30}|(Q_3 - Q_{30}) + K_3(H_3 - H_{30}) \quad (31)$$

$$\frac{dQ_4}{dt} = -2K_4R_4|Q_{40}|(Q_4 - Q_{40}) + K_4(H_4 - H_{40}) \quad (32)$$

$$\frac{dG_3}{dt} = \frac{-G_3}{V_3}\Big|_{Q'_3=Q'_{30}}(Q'_3 - Q'_{30}) - \frac{Q'_3}{V_3}\Big|_{G_3=G_{30}}(G_3 - G_{30}) \quad (33)$$

$$\frac{dG_2}{dt} = \frac{-G_2}{V_2}\Big|_{Q'_4=Q'_{40}}(Q'_4 - Q'_{40}) - \frac{Q'_4}{V_2}\Big|_{G_2=G_{20}}(G_4 - G_{20}) \quad (34)$$

$$\frac{dG_1}{dt} = \frac{-G_1}{V_1}\Big|_{Q_3=Q_{30}}(Q_3 - Q_{30}) - \frac{Q_3}{V_1}\Big|_{G_1=G_{10}}(G_1 - G_{10}) \quad (35)$$

Las ecuaciones (33), (34) y (35) se obtienen al realizar las derivadas parciales de las ecuaciones (11), (12) y (13) respectivamente. Los puntos de trabajo G_{30} , G_{20} y G_{10} se ubican en el nivel de concentración de gas permitido para cada frente de trabajo. Q'_{40} y Q'_{30} son los flujos de aire ingresado por los ventiladores en el punto de trabajo.

Evaluando las ecuaciones en los puntos de equilibrio se obtienen las constantes k para cada punto y la forma general de la ecuación linealizada (40) para la dinámica de los gases.

$$k_Q = \left. \frac{G}{V} \right|_{Q'=Q'_0} \quad (36)$$

$$k_G = \left. \frac{Q}{V} \right|_{G=G_0} \quad (37)$$

$$\hat{Q}(t) = (Q' - Q'_0) \quad (38)$$

$$\hat{G}(t) = (G - G_0) \quad (39)$$

$$\frac{dG}{dt} = -k_Q \hat{Q}(t) - k_G \hat{G}(t) \quad (40)$$

Este proceso se repite de igual forma sobre las ecuaciones (29) y (30) para obtener la forma general de la linealización para la dinámica de los flujos.

2.6 SIMULACIÓN DE RED DE VENTILACIÓN

El objetivo de realizar esta simulación es ver la forma de las curvas de cada uno de los sistemas modelados (flujos y gases). Los resultados de la simulación no corresponden directamente a los del prototipo, porque en su realización se usaron parámetros obtenidos de [20], los cuales son base de un estudio de una red de ventilación con una estructura similar a la del prototipo razón por la cual no se realiza un proceso de comparación de resultados prácticos y de simulación

Como complemento o aporte se simula un sistema de licuado de gases en los frentes de trabajo y una rama por la que circula un flujo de aire modelado anteriormente.

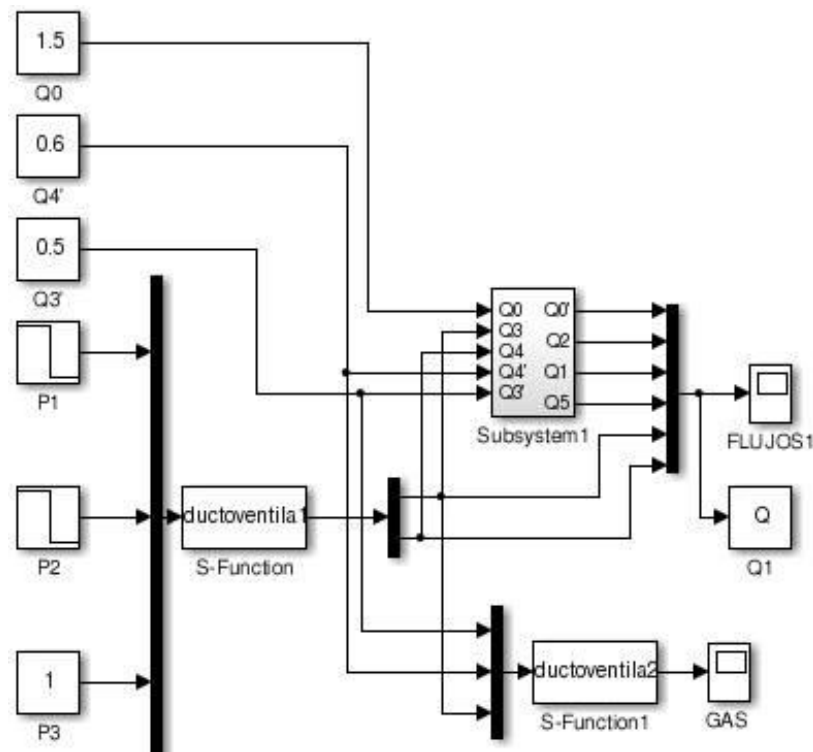


Figura 12. Diagrama de bloques de la representación no lineal del prototipo

En el bloque S-function se describen los modelos no lineales calculados en las ecuaciones (5) y (6) de las ramas 1 y 2, en el Subsystem 1 se encuentran las ecuaciones algebraicas (7), (8), (9) y (10) que relacionan los diferentes flujos y en S-function 1 se modelan los sistemas no lineales de los gases usando las ecuaciones (11), (12) y (13). La descripción anterior corresponde a los bloques del sistema de la Figura 12.

La simulación inicia en el estado estable de los flujos de las ramas 1 y 2, los cuales se alteran al aumentar las diferencias de presiones entre los puntos inicial y final de cada rama. En la simulación se observa la estabilidad del sistema y su convergencia a un nuevo punto de equilibrio como se observa en la Figura 13.

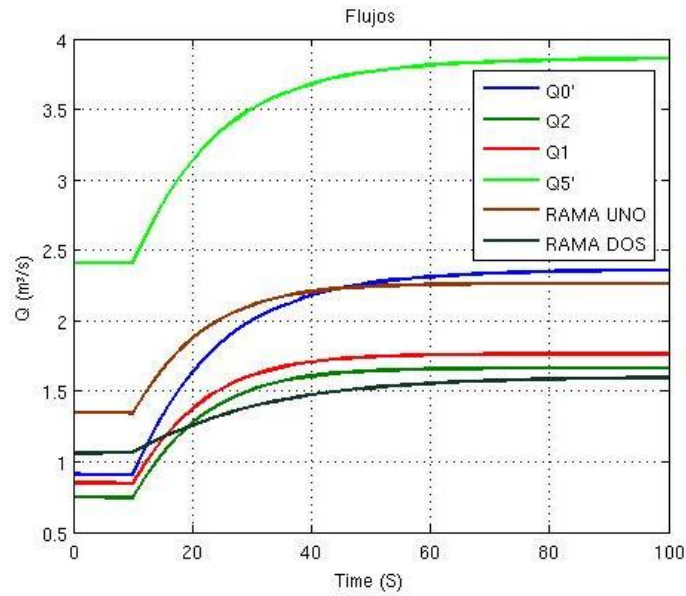


Figura 13. Comportamiento de los flujos en el prototipo

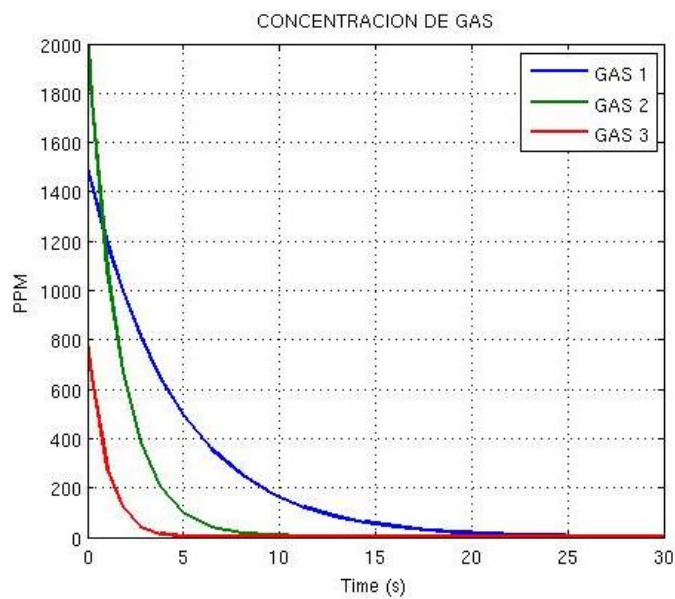


Figura 14. Comportamiento de los gases en el prototipo

Como conclusion de este capitulo se determina que todos los sistemas son de primer orden, pero el comportamiento del modelado de los flujos es ascendente al aumentar la presión (Figura 13) y el de los gases es la accion inversa (Figura 14) el cual se estabiliza en una concentración igual a cero.

CAPITULO 3: ESTIMACIÓN DE PARAMETROS Y CONTROLADORES

En este capítulo se trabajan las herramientas necesarias para determinar los parámetros de cada uno de los sistemas planteados, que representan la dinámica del prototipo. Se analizan las estrategias de control con mayor viabilidad en función de los parámetros, actuadores e implementación de algoritmos en los diferentes dispositivos para llevar a cabo el control.

3.1 ESTIMACIÓN DE PARAMETROS

Para la sintonización de un controlador se necesita conocer cada uno de los parámetros que describen la planta, en un plano continuo o discreto. En diferentes casos los parámetros no se pueden calcular de forma teórica por la complejidad de la planta y se recurren a herramientas prácticas para la determinación de los mismos [21].

La obtención de los parámetros se trabaja en el plano discreto por la facilidad de los múltiples algoritmos de estimación e implementación de estrategias de control.

3.2 TERMINOLOGIA USADA PARA LA ESTIMACIÓN DE PARAMETROS

Múltiples autores coinciden en el uso de las mismas variables utilizadas en la estimación de parámetros véase por ejemplo [22].

$y(t)$ Salida del sistema para el caso de una sola salida.

$\{y(t)\}_n \triangleq \{y(t_n), y(t_{n-1}), y(t_{n-2}), \dots\}$ Secuencia de salida.

Si $t_n = nT_m$; $t_k = kT_m$ muestreo periódico.

T_m periodo de muestreo

$u(t)$ Entrada al sistema.

$\{u(t)\}_n \triangleq \{u(t_n), u(t_{n-1}), u(t_{n-2}), \dots\}$ Secuencia de la entrada.

$\theta^* = [\theta_1^* \theta_2^* \theta_3^* \dots \theta_n^*]^T$ Vector de parámetros reales del proceso, desconocidos total o parcialmente.

$\hat{\theta}(t) = [\hat{\theta}_1(t) \hat{\theta}_2(t) \dots \hat{\theta}_n(t)]^T$ Es el estimativo paramétrico de θ^* al instante t .

$\phi(t) = [\phi_1(t) \phi_2(t) \dots \phi_n(t)]^T$ Vector de regresión compuesto de algún tipo de funciones conformadas con elementos seleccionados de $y(t)$, $u(t)$.

La ecuación general de los estimativos a nivel determinístico es:

$$\hat{\theta}(t) = f[\hat{\theta}(t-1), D(t), t]$$

$D(t)$ Denota la información disponible al instante t .

$f[...]$ Función algebraica vectorial. En el caso de sistemas dinámicos $D(t)$ toma la forma de las observaciones presentadas y pasadas de las salidas y entradas.

Una clase amplia de sistemas dinámicos determinísticos tanto lineales como no lineales puede expresarse de la forma:

$$y(t) = \phi(t-1)^T \theta^*$$

$y(t)$ Salida escalar del sistema.

$\phi(t)$ Vector que denota una función lineal o no lineal de $\{y(t-1)\}, \{u(t-1)\}$.

$u(t)$ Entrada del sistema.

$y(t)$ Respuesta del sistema a una entrada $u(t)$.

θ^* Vector de parámetros reales del sistema.

$t = kTm$ Tiempo discreto obtenido por un muestreo periódico con periodo de muestreo Tm .

3.3 ALGORITMO DE MINIMOS CUADRADOS

“Mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico enmarcada dentro de la optimización matemática, en la que se intenta encontrar la función de relación que mejor se aproxime a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático” [23].

Este algoritmo parte de estimativos iniciales $\hat{\theta}(t-1)$ y se llega $\hat{\theta}(t)$ que al aumentar el tiempo tiende a θ^* , minimiza el error de los parámetros calculados [22] y minimiza el criterio [21] representado por la ecuación (41).

$$J(\hat{\theta}(t)) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^t [y(k) - \phi^T(k-1) \hat{\theta}(t)]^2 \quad (41)$$

La convergencia del algoritmo está relacionada con los estimativo iniciales $\hat{\theta}(0)$ por lo que se introducen en el criterio de la ecuación (41) suponiendo $\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}$ y se obtiene el criterio (42) a partir de los parámetros iniciales.

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^t [y(k) - \Phi^T(k-1)\hat{\theta}]^2 + \frac{1}{2} [\theta^* - \hat{\theta}(0)] P_0^{-1} [\theta^* - \hat{\theta}(0)]^T \quad (42)$$

P_0 Matriz positivamente definida simétrica.

Se expande la sumatoria para después derivar con respecto $\hat{\theta}$, se asume $P_0^{-1} = (P_0^{-1})^T$ para despejar $\hat{\theta}(t)$ y $P(t-1)$ en su forma recursiva.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{P(t-2)\Phi(t-1)y(t) - \Phi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1)}{1 + \Phi^T(t-1)P(t-2)\Phi(t-1)} \quad (43)$$

$$P(t-1) = P(t-2) - \frac{P(t-2)\Phi(t-1)P(t-2)}{1 + \Phi^T(t-1)P(t-2)\Phi(t-1)} \quad (44)$$

El procedimiento completo para obtener los modelos recursivos anteriores se encuentra descrito en [22]. Este algoritmo requiere que se definan el tamaño de las matrices a partir del número de parámetros del sistema que se encuentra en modelo DARMA (Auto regresivo de promedio móvil determinístico).

El algoritmo de mínimos cuadrados que se va a implementar se basa en las ecuaciones (43) y (44) donde $\hat{\theta}(t)$ son los parámetros estimados, necesarios para el diseño de los controladores.

3.4 ANALISIS Y DISEÑO DE CONTROLADORES

Las estrategias de control clásico están ligadas a valores de parámetros fijos, para poder obtener la respuesta deseada. Pero en sistemas con parámetros cambiantes estas técnicas no son muy efectivas, porque la respuesta obtenida difiere de la respuesta deseada a causa de los valores diferentes de los parámetros.

Al tener sistemas variantes en el tiempo en el prototipo, se descarta trabajar con estrategias de control clásico y se trabaja con control adaptable. El cual cambia los parámetros de los controladores en respuesta de los cambios de la dinámica del sistema, para obtener la respuesta deseada [24] y reducir el esfuerzo del control.

“El control adaptativo es un tipo de control no lineal en el que el estado del proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferente velocidad.” [24].

El control adaptativo se divide principalmente en dos grupos:

- Controladores adaptativos por modelo de referencia (MRAC): Con este controlador se busca alcanzar el comportamiento deseado en bucle cerrado a partir del modelo de referencia.
- Reguladores autoajustables (STR): se obtiene el mejor control posible a partir de un tipo de controlador prefijado y la información obtenida del proceso.

Los controladores diseñados pertenecen al grupo STR y desarrollan la siguiente lógica de funcionamiento:

- Estimación de parámetros.
- Cálculo de los parámetros del controlador.
- Cálculo y aplicación de la señal de control.

Nota: Todos los pasos mencionados se repiten en cada ciclo de muestreo.

3.5 CONTROLADOR MUERTE SUBITA (DEAD-BEAT)

Este controlador consiste en encontrar la señal de entrada que al ser aplicada a un sistema la salida alcance el estado estacionario en el menor número de pasos, esto se logra al ubicar los polos de la función de transferencia en lazo cerrado en el origen véase [25] [26].

El cálculo de la ley de control se realiza a partir del modelo DARMA igualándolo a la respuesta deseada y obteniendo la señal de entrada en función de los términos restantes del modelo.

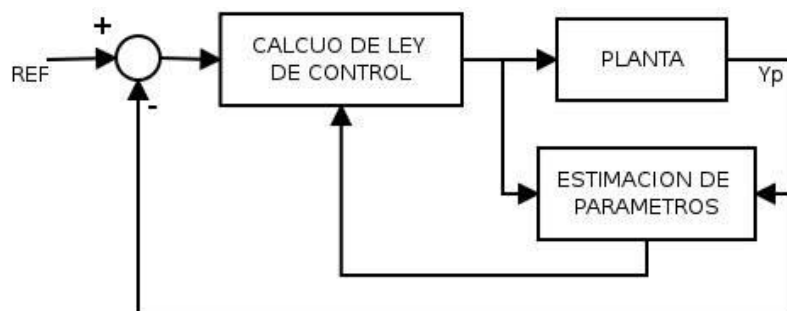


Figura 15. Estructura general de controlador de muerte súbita

Para los diferentes sistemas del prototipo se usa la estructura de la Figura 15 para la implementación del controlador. Para el cálculo de la ley de control se parte del modelo discreto de un sistema de primer orden el cual corresponde para todos los sistemas del prototipo y se lleva a la forma del modelo DARMA (45).

$$y(k) = -a_0 y(k-1) + b_0 u(k-1) \quad d = 1 \quad (45)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_0 z^{-1} \quad B(z^{-1}) = b_0 z^{-1} \quad (46)$$

Los polinomios de (46) son el denominador y numerador de un sistema de primer orden. Adelantando un paso e igualando el modelo DARMA a la señal deseada se obtiene la ley de control en función de los parámetros del sistema y su respuesta (48).

$$-a_0 y(k) + b_0 u(k) = y^*(k) \quad (47)$$

$$u(k) = \frac{y^*(k) - a_0 y(k)}{b_0 + \alpha} \quad (48)$$

Donde α es una constante para evitar valores excesivamente grandes en la señal de control que sobrepasen los valores máximos permitidos. Esto puede ocurrir cuando el valor de la salida este muy alejado del valor deseado y errores cuando se calcula el parámetro b_0 en línea; sobre todo al inicio de la estimación debido a que el valor no se conoce. En la Figura 15 se muestra la estructura general para el controlador de muerte súbita implementado en un sistema no lineal.

3.6 CONTROLADOR POR ASIGNACIÓN DE POLOS

Método que permite la ubicación de polos deseada. La asignación de polos y ceros se debe realizarse de tal modo que se evite tamaños excesivos en la señal de control cuando la salida inicial se encuentre muy alejada del valor deseado [24].

El objetivo del controlador es que la función de transferencia del bucle sea igual a una función de transferencia de la respuesta deseada (49).

$$y(k) = \frac{B_0(z^{-1})}{A_0(z^{-1})} Z^{-d} u(k) \quad (49)$$

Los dos polinomios de la ecuación (49) son de orden n , para la asignación de polos se debe resolver la ecuación (50) de ubicación de polos en cada instante k para después calcular la señal de control.

$$A(Z^{-1})\theta(Z^{-1}) + B(Z^{-1})\beta(Z^{-1}) = A_0(Z^{-1}) \quad (50)$$

Los polinomios $A(Z^{-1})$ y $B(Z^{-1})$ presenta la dinámica del sistema y se calculan en línea con el algoritmo de mínimos cuadrados y son de orden r . $\theta(Z^{-1})$ y $\beta(Z^{-1})$ son los polinomios que deben calcularse para asignar los polos en la ubicación deseada y son orden $r - 1$. El orden de los polinomios del sistema de referencia es igual a $n = 2r - 1$.

La señal de control se calcula usando la ley de retroalimentación expresada en (51).

$$u(k) = \frac{\beta(Z^{-1})}{\theta(Z^{-1})} \{y^*(k) - y(k)\} \quad (51)$$

El cálculo de la ley de control y solución de la ecuación (50) con todas sus condiciones se realiza en [50].

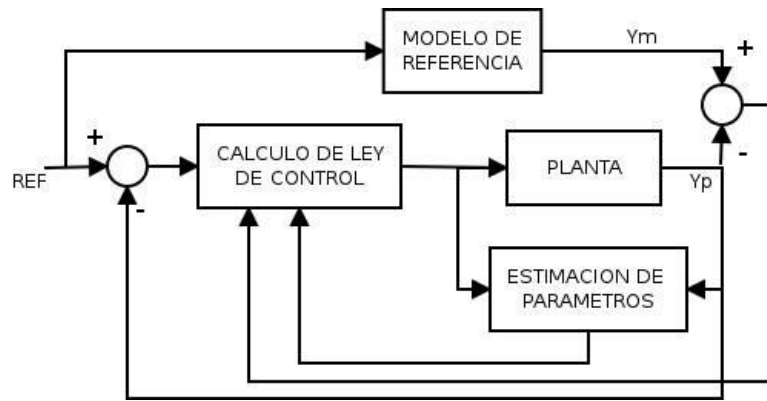


Figura 16. Estructura general de controlador de ubicación de polos

Para los diferentes sistemas del prototipo se implementa la estructura de la Figura 16, se parte del modelo discreto de un sistema de primer y se obtiene el modelo DARMA respectivo.

$$y(k) = -a_0 y(k-1) + b_0 u(k-1) \quad d = 1 \quad (52)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_0 z^{-1} \quad B(z^{-1}) = b_0 z^{-1} \quad r = 1 \quad (53)$$

Se plantea la ecuación (50) respectiva para un sistema de primer orden (54) y se calculan los polinomios de asignación de polos con las ecuaciones (56) y (57).

$$(1 + a_0 z^{-1}) \theta(z^{-1}) + b_0 z^{-1} \beta(z^{-1}) = a^* + a_1^* z^{-1} \quad a^* = 1 \quad (54)$$

$$\theta + a_0 \theta z^{-1} + b_0 \beta z^{-1} = a^* + a_1^* z^{-1} \quad (55)$$

$$a_0 z^{-1} + b_0 \beta z^{-1} = a_1^* z^{-1} \quad \theta = 1 \quad (56)$$

$$\beta = \frac{a_1^* - a_0}{b_0} \quad (57)$$

$$u(k) = \frac{a_1^* - a_0}{b_0} \{y^*(k) - y(k)\} \quad (58)$$

La ecuación (58) representa la ley de control que hay que calcular en cada instante k para determinar la señal de control.

3.7 SIMULACIÓN DE SISTEMA CONTROLADOR

Las estrategias de control se prueban sobre los sistemas del prototipo, con el objetivo de ver el comportamiento de los controladores alrededor del punto de equilibrio. Para llevar a cabo estas pruebas se realiza una simulación en la cual se usa el bloque S-function para representar un sistemas no lineal y se agrega un bloque M2M en el cual se implementa un algoritmo de estimación de parámetros basado en los mínimos cuadrados con reinicialización de la matriz de covarianza y factor de olvido exponencial, para estimar los parámetros de cada uno de los sistemas [27], en el bloque MATLAB Function se implementa las estrategias de control basadas en métodos algebraicos y muerte súbita. La interconexión de los diferentes bloques se observa en la Figura 17.

El primer controlador simulado es el de asignación de polos, se realiza la estimación de parámetros en lazo abierto del sistema para usar el resultado como modelo de referencia en la ley de control.

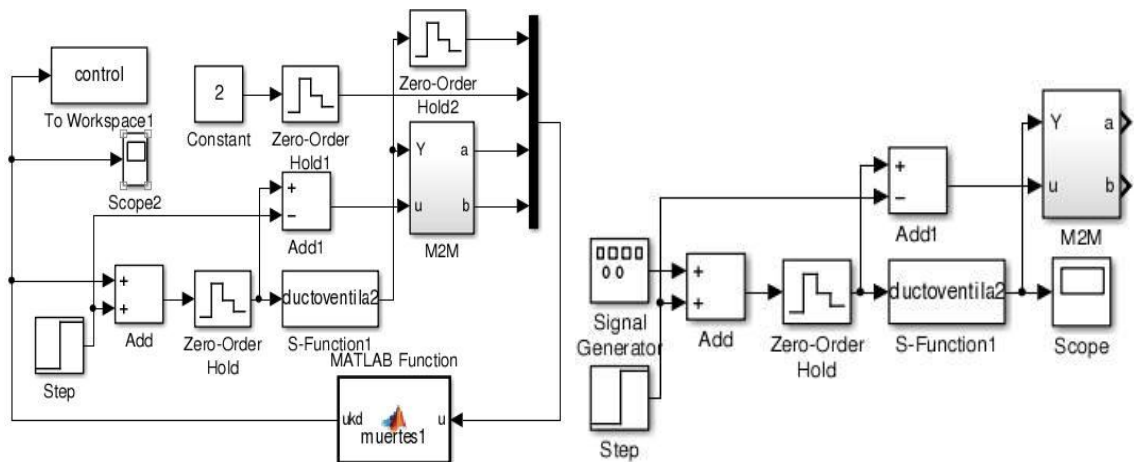


Figura 17. Izq: Diagrama de la planta con control, Der: Diagrama de la planta sin control

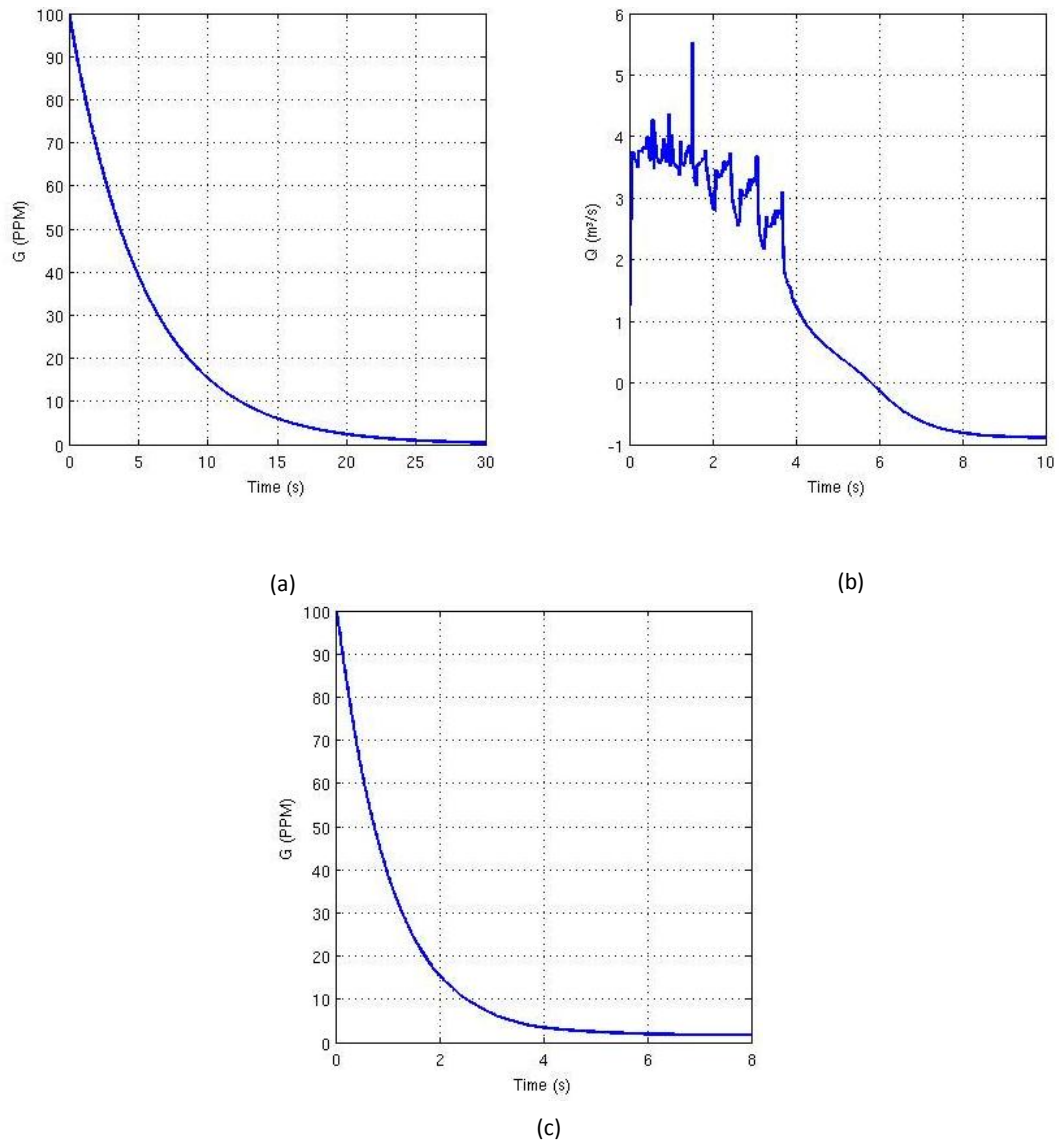


Figura 18. Resultado de la simulación: (a) Respuesta sin control, (b) Señal de control, (c) Respuesta con control

Para la Figura 18 (b) la señal de control tiene un comportamiento no deseado que puede generar problemas en la implementación práctica por las limitaciones de los actuadores para trabajar con señales de control con valores negativos. La señal representa que los actuadores deben cambiar el sentido de giro para pasar de inyectores a extractores. La comparación de las Figuras 18 (a) y (c) muestra que el sistema tiene un menor tiempo de estabilización al presentarse una perturbación.

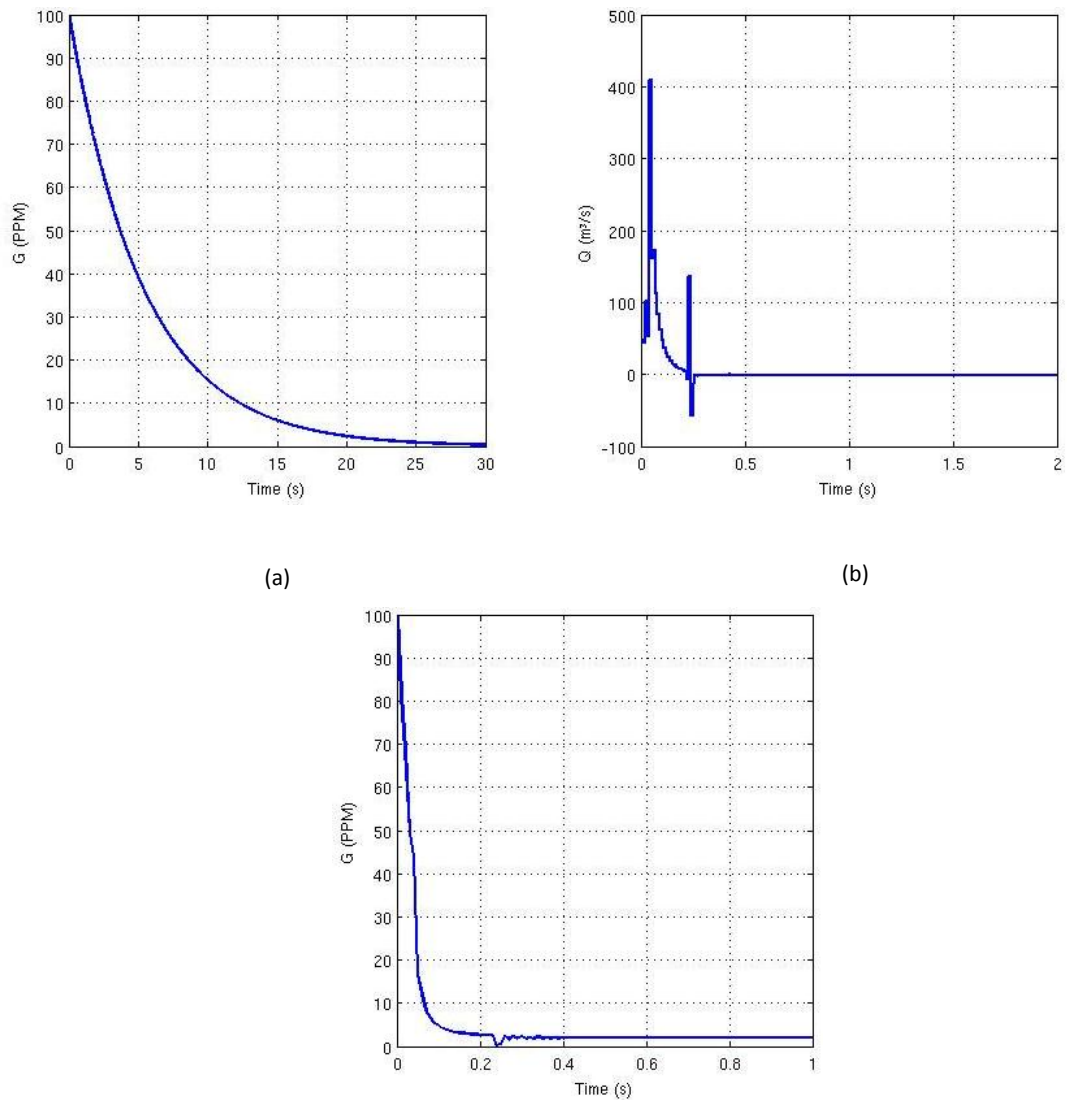


Figura 19. Resultado de la simulación: (a) Respuesta sin control, (b) Señal de control, (c) Respuesta con control

En la Figura 19 (b) la señal de control de la estrategia de control de muerte súbita tiene sobre picos que no se podrán alcanzar en la práctica lo que producirá que el tiempo de establecimiento del sistema este limitado por las características físicas de los actuadores y sea muy diferente al que se tendría de no tener estas limitaciones. La comparación de las Figuras 19 (a) y (b) muestra que el sistema tiene un menor tiempo de estabilización al presentarse una perturbación.

CAPITULO 4: IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se trabaja la implementación del algoritmo de estimación y las diferentes técnicas de control, con las que se realizaran las pruebas de funcionamiento en el prototipo. Se describe brevemente cada aspecto tenido en cuenta en la implementación del algoritmo (código-interfaz).

4.1 REQUERIMIENTOS

La herramienta de desarrollo seleccionada es Python [28], la cual tiene la capacidad de trabajar en múltiples plataformas, numero extendido de librerías [29][30][31], y diferentes framework [32][33], los cuales son muy útiles para darle el aspecto y funcionalidad deseada a la interfaz.

La interfaz gráfica desarrollada debe ser funcional e independiente al proceso de muestreo, para evitar que esta se bloquee o detenga durante el muestreo y se presenten errores en la visualización de las múltiples señales y los algoritmos implementados.

Cada proceso se implementa en plataformas independientes: en la beaglebone [15] se implementan los algoritmos para el acondicionamiento de los diferentes sensores y la generación de las señales de control. Luego se empaquetan en un mismo formato todos los datos obtenidos de los sensores para enviarlos al computador.

Los diferentes algoritmos y la interfaz gráfica se realizan en el computador. La comunicación entre los dos programas se logra utilizando sockets a través de comunicación Ethernet.

El tiempo de muestreo se genera desde el computador usando la función *TimerEvent* que permite sincronizar la beaglebone con el computador y de esta forma se garantiza un periodo de muestreo igual.

4.2 CALCULO DE FLUJOS

Para calcular los flujos de las ramas 1 y 2, se usa la teoría del tubo de pitot la cual es utilizada para la medición de la velocidad del aire mediante la diferencia de presión en dos puntos distintos [34]. Esta teoría se adapta en el prototipo usando los sensores de presión ubicado en cada extremo de las ramas.

La presión diferencial entre dos puntos del ducto de ventilación se calcula utilizando la ecuación de Bernoulli ver ecuación (59). Según esta ecuación la presión diferencial es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido [34].

$$V = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}}$$

(59)

Donde P_2 y P_1 son las presiones en dos puntos y ρ es la densidad del aire.

4.3 ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA

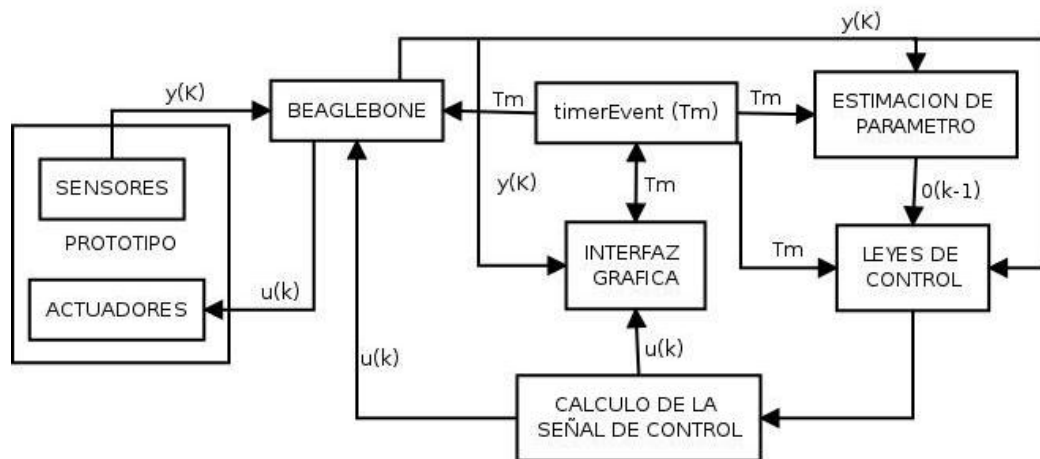


Figura 20. Esquema de funcionamiento del programa

En la Figura 20 se ilustra el flujo de los datos entre las diferentes partes del programa y los resultados que entrega cada clase del programa, para realizar las pruebas de los controladores se reemplaza la clase ubicada en el bloque de leyes de control conservando intacta el resto de la estructura del programa.

4.4 DISEÑO DE INTERFAZ GRAFICA

La interfaz gráfica está compuesta por dos ventanas Figura 21 y 22 desarrolladas usando la librería PyQt [33], en la primera ventana (Figura 21) se encuentran todas las herramientas para configurar las múltiples opciones de cada uno de los algoritmos, establecer la conexión con la beaglebone, graficar las señales de sensores y actuadores. En la segunda ventana (Figura 22) se grafica los diferentes caudales y parámetros de cada uno de los sistemas.

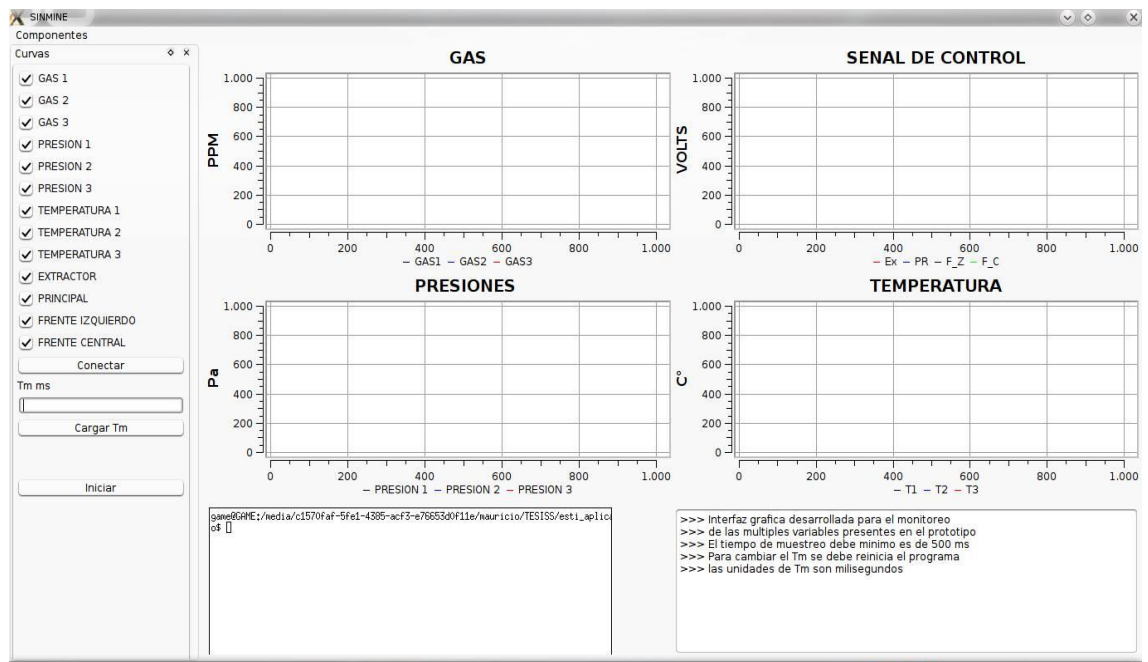


Figura 21. Ventana principal de la interfaz

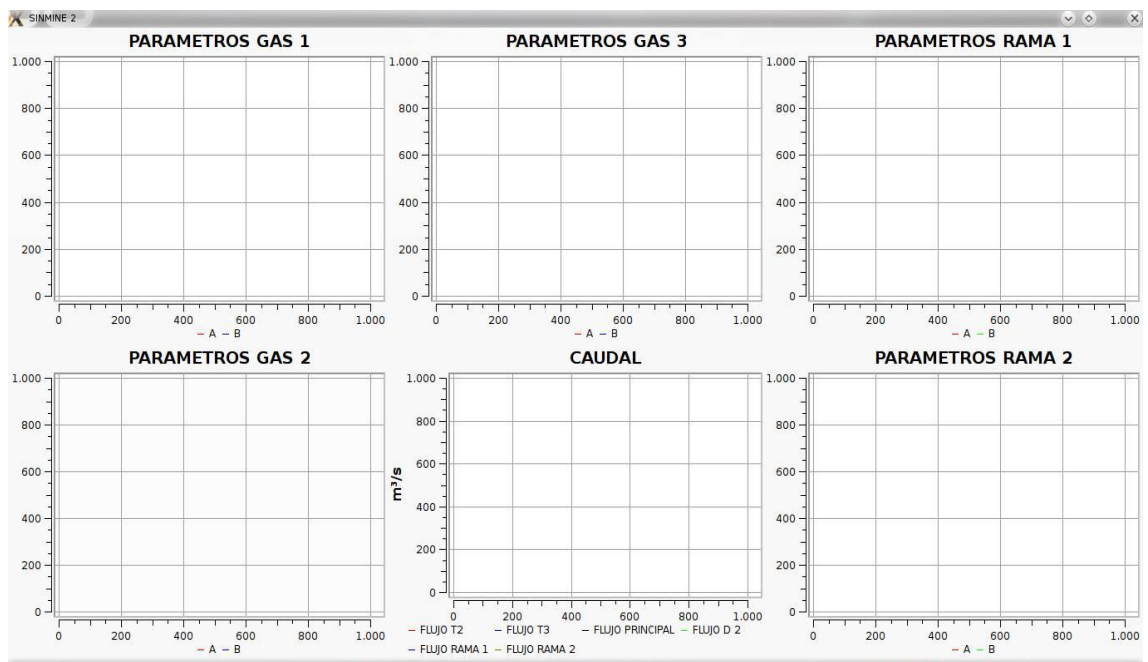


Figura 22. Segunda venta de la interfaz

4.5 ALGORITMOS DE DETERMINACIÓN DE PARAMETROS

Por los requerimientos matriciales del algoritmo de mínimos cuadrados se utiliza la librería Numpy [29] debido a la inexistencia de estos objetos en python y facilita evaluar las operaciones requeridas por el algoritmo. La Figura 23 muestra el orden de los pasos previos antes de evaluar las ecuaciones (43) y (44) que entregan el valor de los parámetros calculados para el sistema.

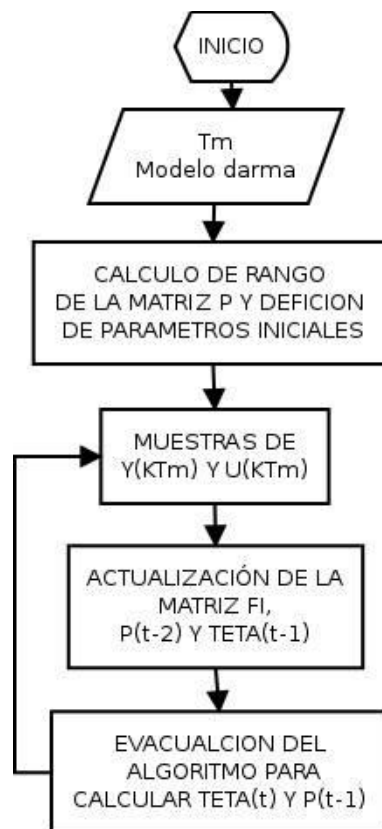


Figura 23. Diagrama de flujo para el algoritmo de mínimos cuadrados

El funcionamiento del algoritmo se verifica a partir de la lectura de archivos de texto que contienen las muestras de las señales de entrada y salida del sistema, las muestras se obtienen de una simulación realizada en Simulink usando la estructura de la Figura 24. En la misma simulación se verifica el comportamiento del algoritmo con ayuda de las herramientas del simulador.

El algoritmo implementado estima los parámetros para un sistema discreto de primer orden representado por el modelo DARMA (45). En las Figuras 27 y 28 las curvas A y B representan los coeficientes de los polinomios la ecuación (46) respectivamente.

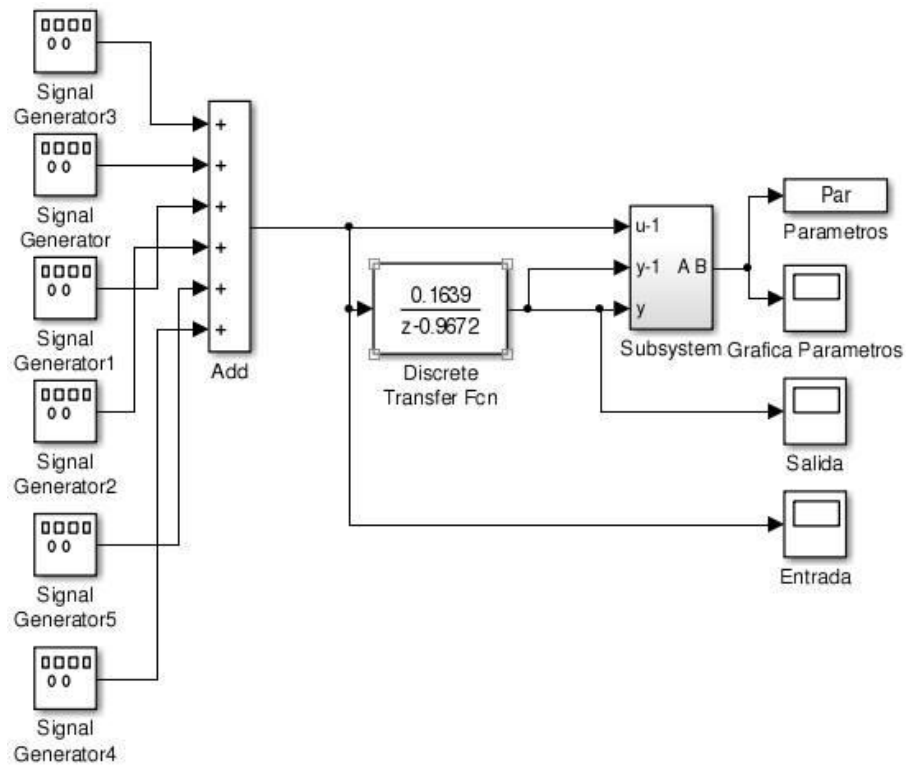


Figura 24. Diagrama de bloques prueba de algoritmo

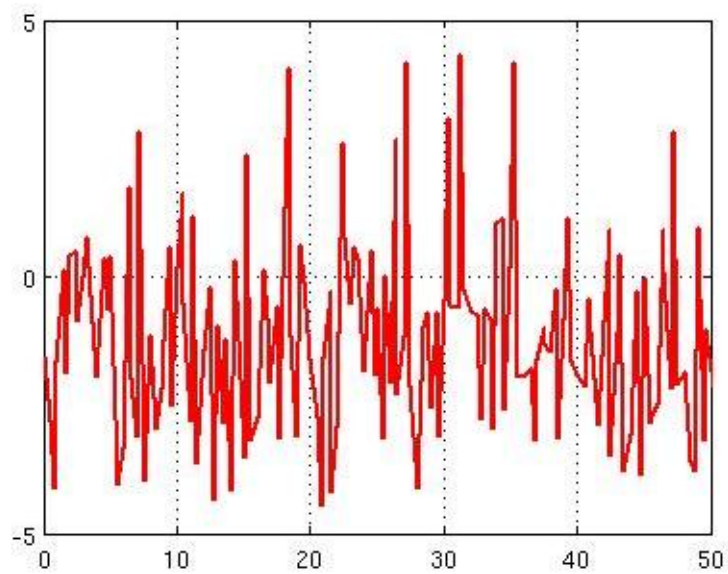


Figura 25. Señal de excitación

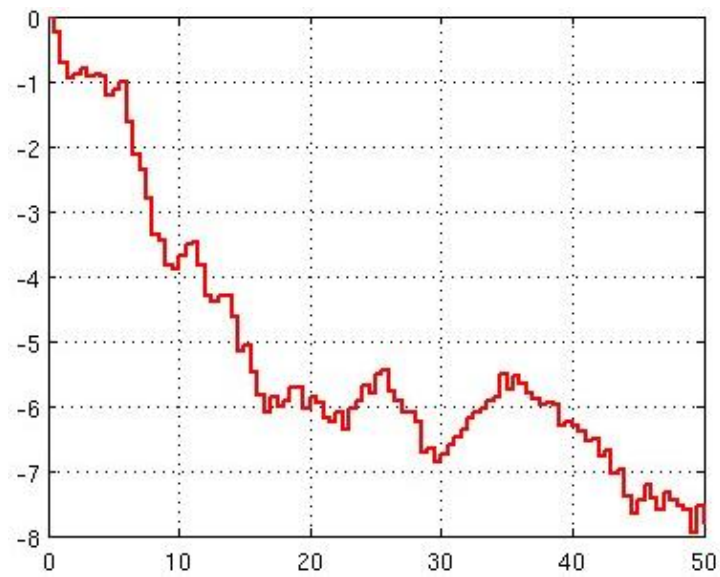


Figura 26. Respuesta del sistema a la señal de excitación

En la simulación la señal de excitación y respuesta del sistema son aleatorias como se observa en la Figuras 25 y 26 respectivamente, para reducir el tiempo que le toma al algoritmo en converger y entregar los valores de los parámetros que se ajusten más a la dinámica del sistema.

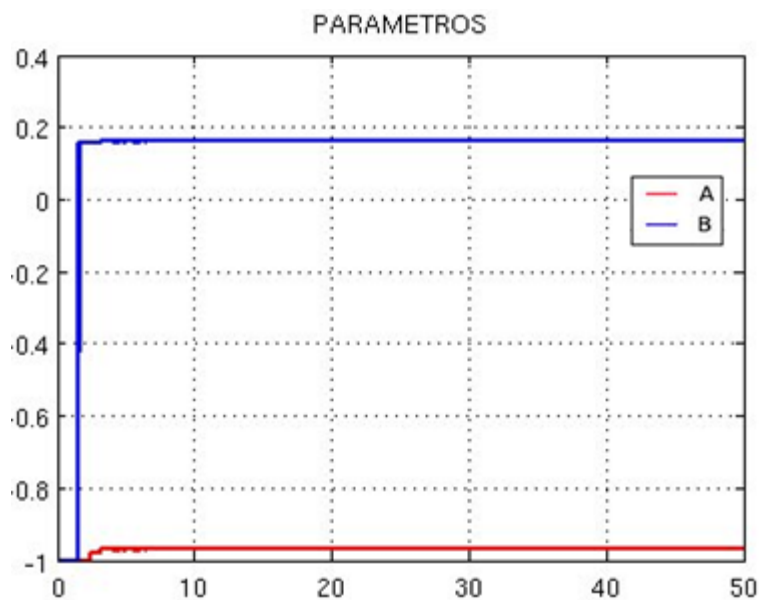


Figura 27. Comportamiento del algoritmo en Simulink

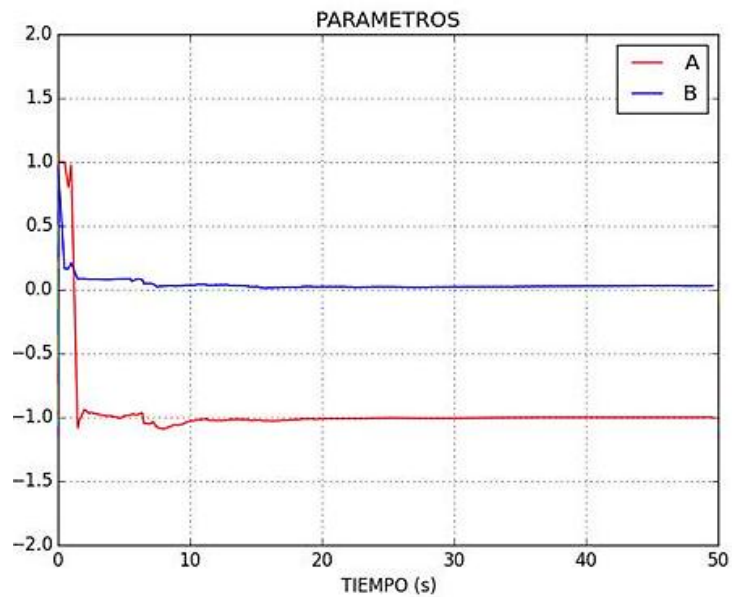


Figura 28. Comportamiento del algoritmo en python

Los resultados obtenidos en las dos implementaciones convergen a los mismos valores de los parámetros, con diferencias en la velocidad que estos se estabilizan y el valor inicial de cada implementación vistos en las Figuras 27 y 28. La diferencia del valor inicial en la segunda implementación con respecto a la primera se produce por no poder inicializar una matriz en valores negativos.

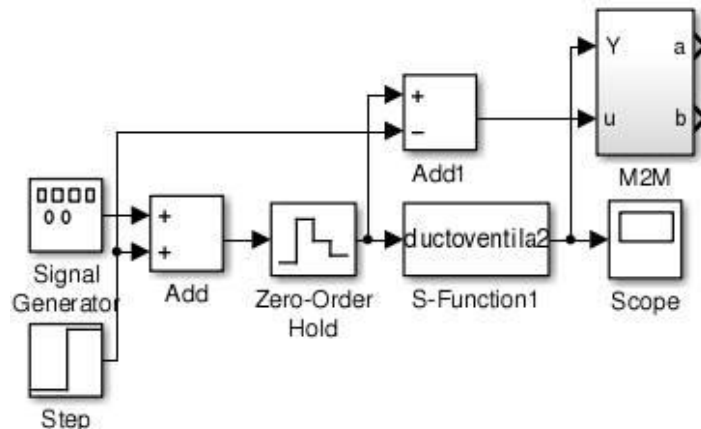


Figura 29. Diagrama de implementación práctica de los estimadores

Como los sistemas del prototipo son no lineales, la estimación se realiza alrededor del punto de equilibrio usando la estructura de la Figura 29, la señal $u(k)$ que entra al bloque M2M es la diferencia entre la señal de excitación de la planta menos el punto de equilibrio.

4.6 ALGORITMOS DE IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES

La señal de control es evaluada en una clase aparte que construye el objeto 'controlador' en el que se almacenan las n muestras requeridas por el controlador. Para cada cálculo de la señal $u(k)$ la clase requiere de los parámetros calculados en el instante k . Dentro del método 'evaluar' se realizan los cálculos de cada una de las leyes de control; para el controlador de asignación de polos se usó la ecuación (51) y el de muerte súbita la ecuación (48).

En el programa se tienen dos controladores independientes, actuando cada uno sobre un sistema diferente (G_3, M_2) (G_2, M_3) , donde M_n son los actuadores y G_n la respuesta del sistema. Para cada instante k se realiza un llamado al método 'evaluar' de cada controlador y se calcula la señal de control a aplicar a los actuadores, simulados en Matlab Figura 30.

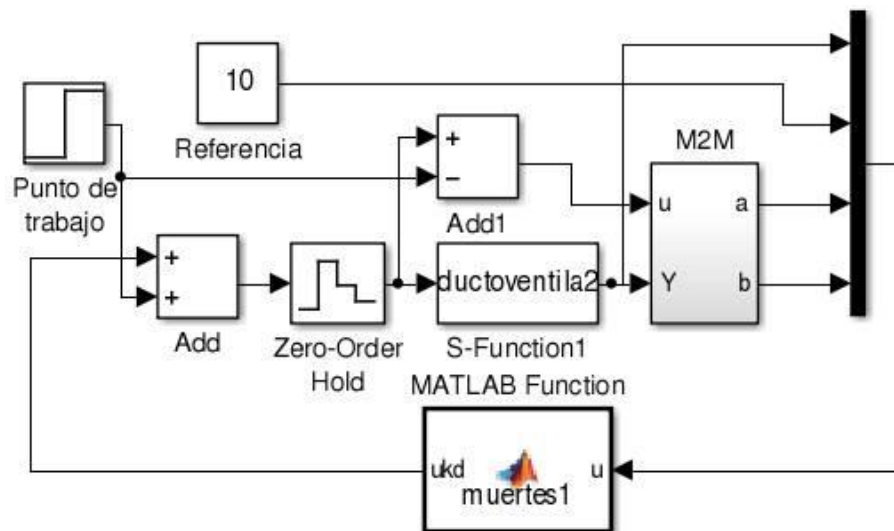


Figura 30. Estructura práctica de las estrategias de control

CAPITULO 5: PRUEBAS Y VALIDACIÓN

En este capítulo se realizan diferentes pruebas con las que se observa el comportamiento del circuito de ventilación en lazo abierto y lazo cerrado, con el fin de hacer notar la mejoría al implementar controladores a una estrategia VSD [7], se analizan los resultados de las dos estrategias de control probadas en el prototipo, para ver el esfuerzo de control de cada una de estas.

5.1 CONSIDERACION DE PERTURBACIONES

Para observar los efectos de los actuadores y comportamiento del circuito de ventilación se usa humo blanco de densidad similar a la del aire, el cual permite estudiar el comportamiento del circuito de ventilación con modificaciones despreciables (Figura 31). A diferencia si se usa una perturbación de densidad mayor a la del aire como es el caso del gas butano que afecta las presiones del circuito (Figura 32).

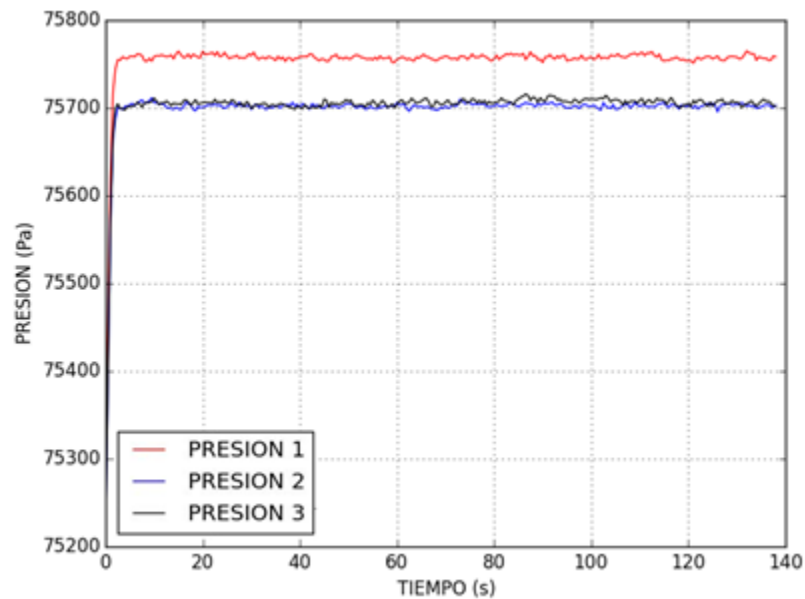


Figura 31. Presiones al inyectar humo blanco

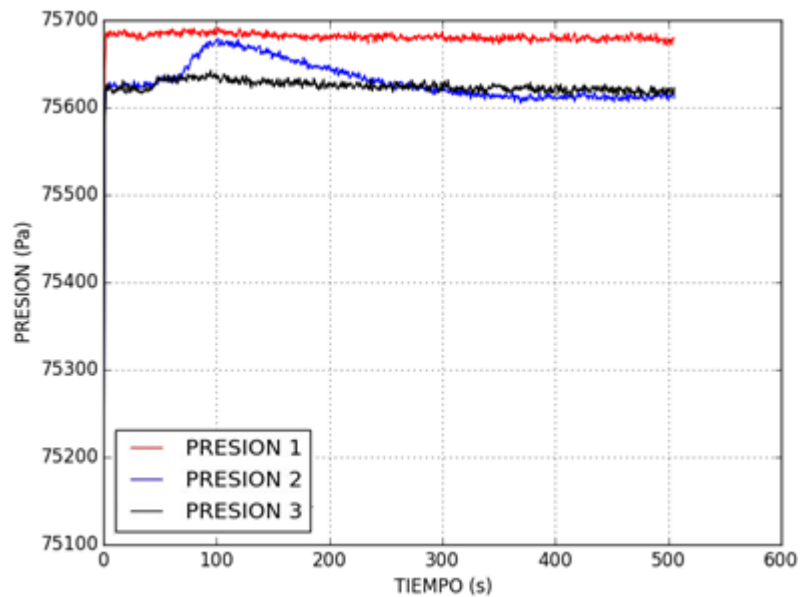


Figura 32. Presiones al inyectar gas butano

5.2 CARACTERIZACION DE VENTILADORES

La caracterización de los ventiladores se realiza con la ayuda de un anemómetro con el que se mide el flujo de salida de cada ventilador al variar el voltaje de alimentación realizando cambios del ciclo útil del PWM de la señal de control. Con los datos obtenidos elaboraran Figuras 33, 34, 35, 36 y 37 y se lleva a cabo una regresión lineal para obtener las ecuaciones (60), (61), (62), (63) y (64) que representan las funciones de transferencia de los ventiladores.

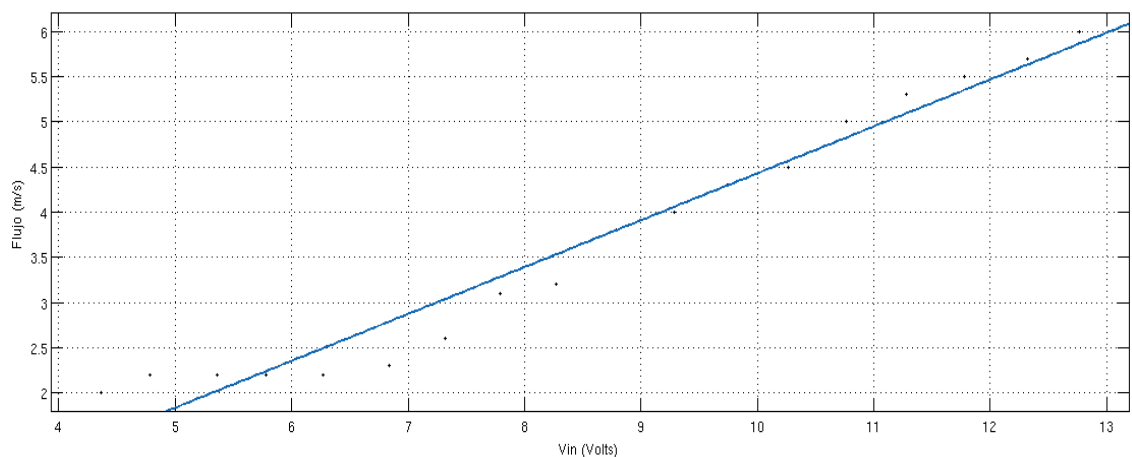


Figura 33. Curva de transferencia de M1

La ecuación (60) es la función de transferencia de voltaje vs flujo para M1:

$$f(x) = 0.519x - 0.7615 \quad (60)$$

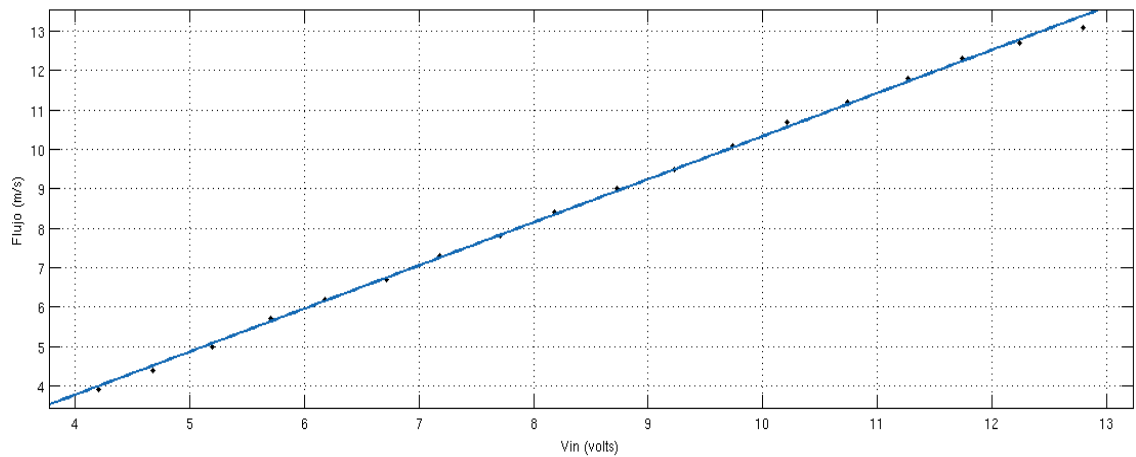


Figura 34. Curva de transferencia de M2

La ecuación (61) es la función de transferencia de voltaje vs flujo para M2:

$$f(x) = 1.095x - 0.6173 \quad (61)$$

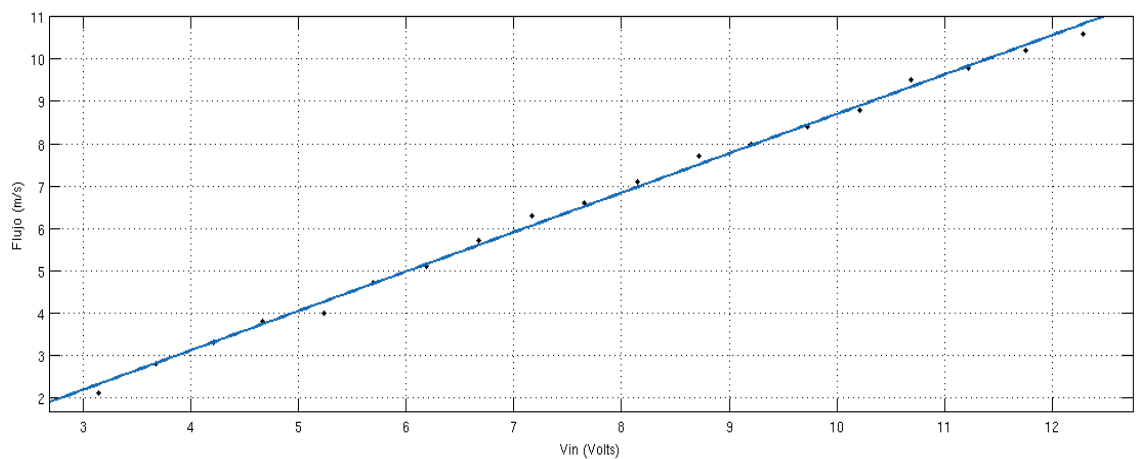


Figura 35. Curva de transferencia de M3

La ecuación (62) es la función de transferencia de voltaje vs flujo para M3:

$$f(x) = 0.9317x - 0.62 \quad (62)$$

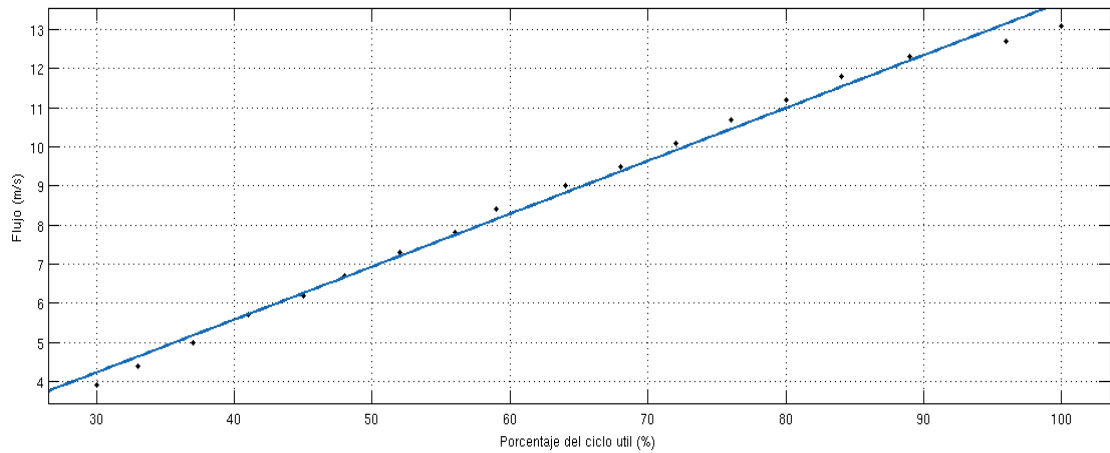


Figura 36. Relación entre ciclo útil del PWM vs voltaje aplicado a M2

La ecuación (63) es la función de transferencia del ciclo útil vs flujo de M2:

$$f(x) = 0.1354x + 0.1563 \quad (63)$$

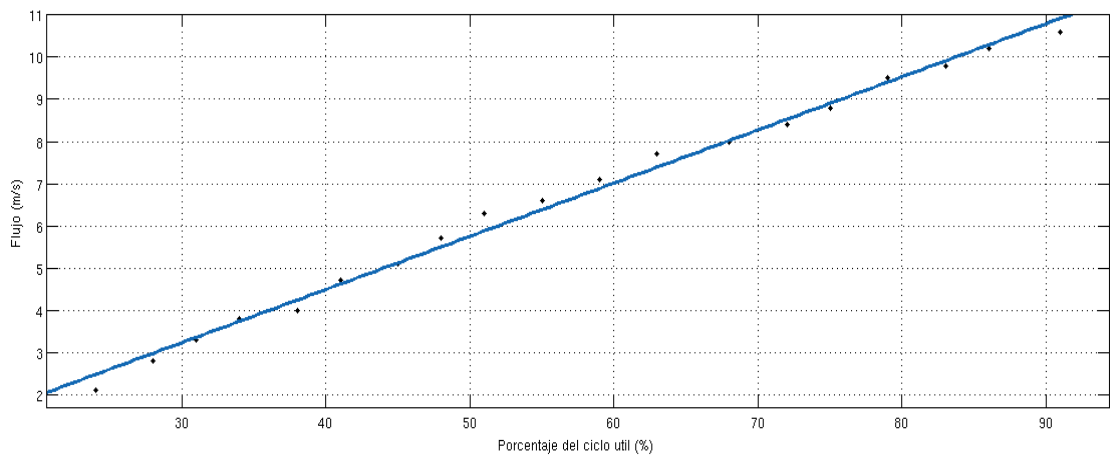


Figura 37. Relación entre ciclo útil del PWM vs voltaje aplicado a M3

La ecuación (64) es la función de transferencia del ciclo útil vs flujo de M3:

$$f(x) = 0.1261x - 0.5541 \quad (64)$$

Las ecuaciones (60), (61), (62), (63) y (64) se usan como observadores sobre las señales de control y flujos de cada motor, proporcionan información de voltajes y flujos solo conociendo el ciclo útil aplicado sobre cada motor por la ley de control y el punto de trabajo.

5.3 RESPUESTA EN PUNTO DE EQUILIBRIO SIN CONTROL

Los sistemas no lineales del prototipo alcanzan un punto de equilibrio para los niveles de flujos inyectado por cada actuador, puntos que son la referencia sobre la cual se determina la dinámica del sistema y actúan los controladores para reducir el tiempo de estabilización de los sistemas. Para observar los puntos de equilibrio de manera práctica, el nivel de flujo para M2 y M3 es reducido por el pequeño volumen de las galerías y poder hacer perceptible el efecto del control.

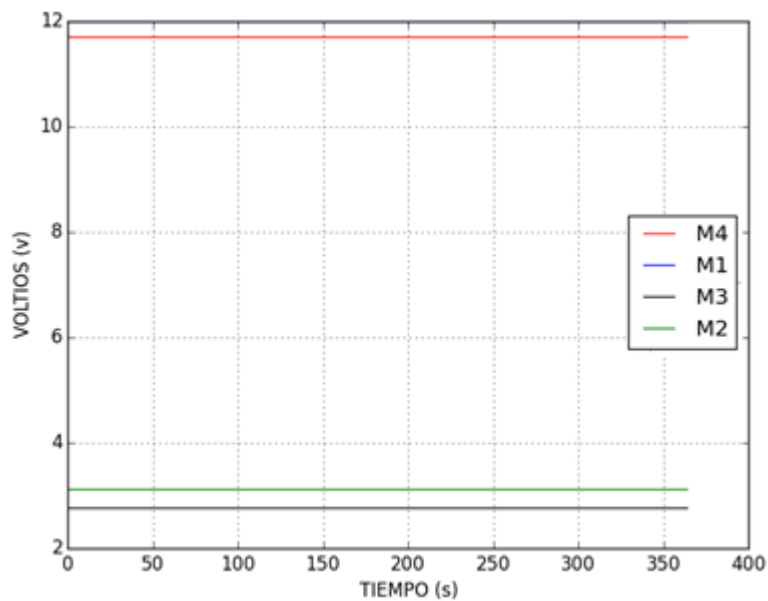


Figura 38. Señales de control en punto de equilibrio

Las Figura 38 y 39 muestra los observadores calculados para el voltaje y flujos sobre los ventiladores usando el ciclo útil aplicado sobre cada uno de estos en el punto de trabajo.

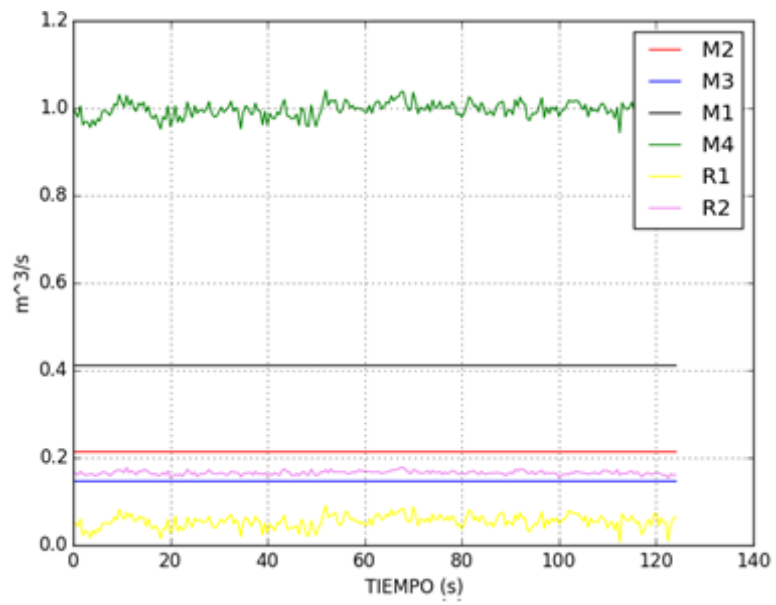


Figura 39. Comportamiento de los flujos de aire en el punto de equilibrio

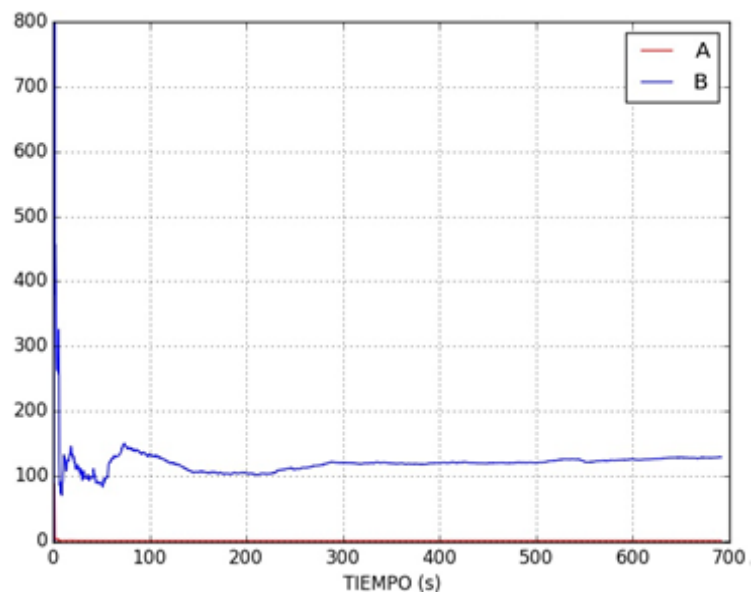


Figura 40. Parámetros del sistema Rama 1

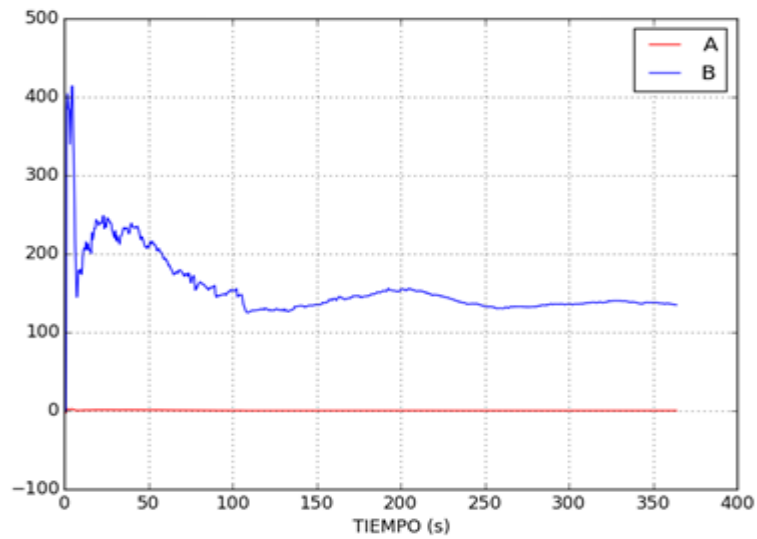


Figura 41. Parámetros del sistema Rama 2

Las Figuras 40 y 41 representan el comportamiento de los algoritmos de estimación implementados para cada rama, el parámetro B es pequeño, por las dimensiones de construcción del prototipo y el parámetro A relaciona la resistencia dinámica de cada rama con sus dimensiones. A y B los coeficientes de a_o y b_o respectivamente del modelo DARMA (45).

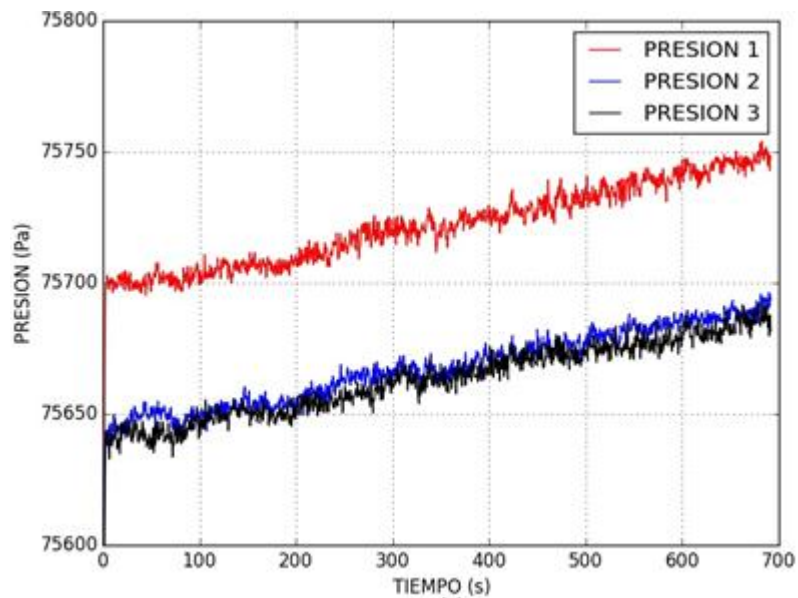


Figura 42. Comportamiento de las presiones en el punto de equilibrio

En los puntos de equilibrios las presiones se mantienen constantes como se observa en la Figura 42, el ruido en las señales se producen por la sensibilidad de los sensores. Las perturbaciones se realizan inyección de humo directamente en cada frente, permitiendo observar la dinámica de disolución del gas en cada uno de los puntos de medición (sensores G1, G2 y G3).

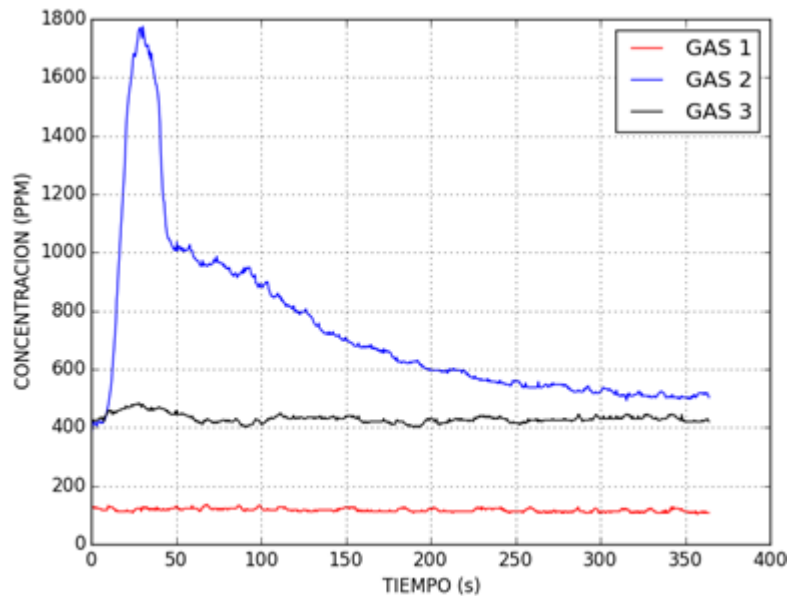


Figura 43. Dinámica de gases ante perturbación por frente izquierdo

En la Figura 43 se observa la dinámica de los gases registrada por cada sensor al inyectar gas en el frente de trabajo izquierdo y llevar la concentración al valor máximo posible para ese frente usando el humo seleccionado para las pruebas.

Se realiza la misma prueba anterior pero en este caso la inyección de la perturbación se realiza directamente sobre el frente central del prototipo y se hace perceptible el desplazamiento del humo por la rama al incrementar la señal del sensor GAS 1 ubicado sobre una de las ramas del prototipo como se observa en la Figura 44.

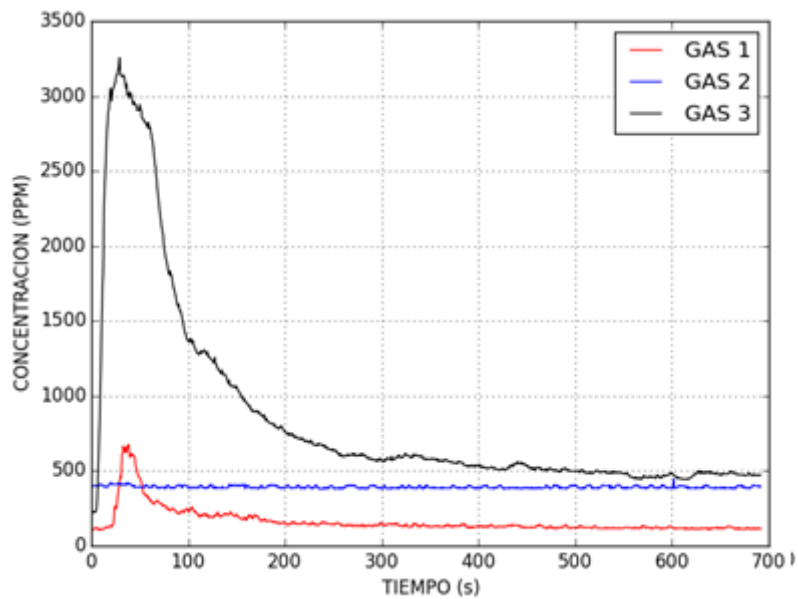


Figura 44. Dinámica de gases ante perturbación por frente central

5.4 CONTROLADOR POR ASIGNACION DE POLOS

Para la prueba de esta estrategia de control se generan perturbaciones en cada uno de los frentes inyectando humo, hasta alcanzar un valor cercano de PPM al de las curvas de las Figuras 43 y 44. Al alcanzar este nivel en las perturbaciones se deja de inyectar humo, para poder observar cómo cambia la dinámica del sistema en lazo cerrado.

Después de cada prueba se generan las gráficas en las que se observa el comportamiento de la concentración de gas, niveles de voltaje de las señales control, los diferentes flujos y la convergencia de los algoritmos de estimación de parámetros de los sistemas de concentración de los gases.

La primera prueba de la estrategia de control se realiza generando la perturbación en el frente izquierdo, con la que se debe observar cambios en la dinámica de los flujos y gas.

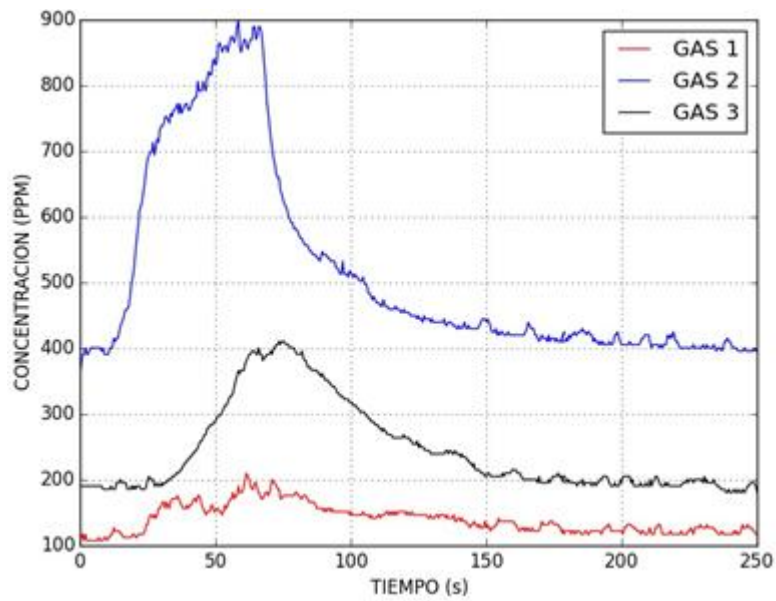


Figura 45. Dinámica de gases ante perturbación por frente izquierdo

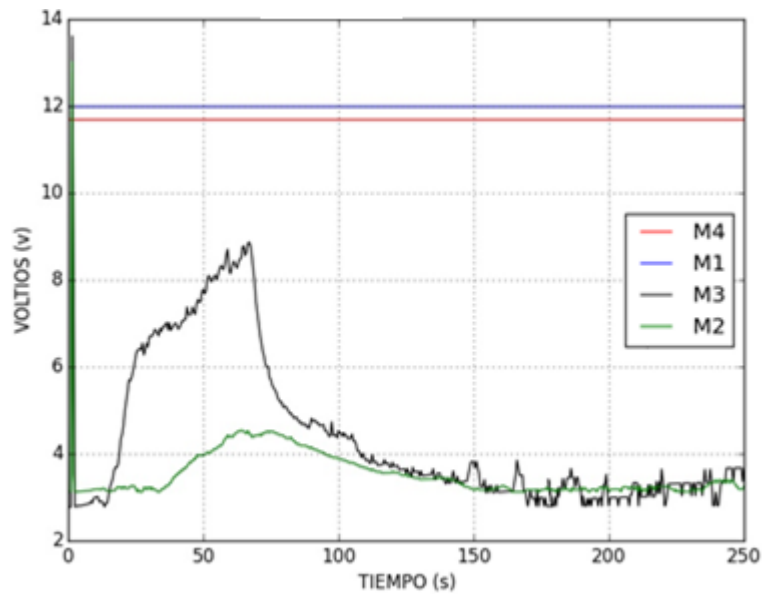


Figura 46. Señales de control para perturbaciones por frente izquierdo

En la Figura 45 se observa el comportamiento del sistema durante y después de la perturbación. El comportamiento de las señales de control (Figura 46) y flujos (Figura 47) son similares, porque los observadores usados para generarlas son lineales y se calculan a partir de la misma señal.

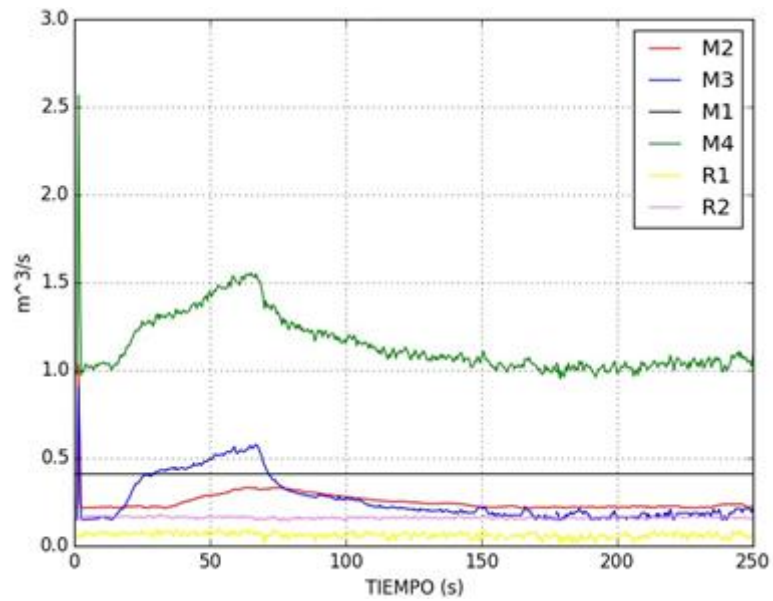


Figura 47. Comportamiento de los flujos

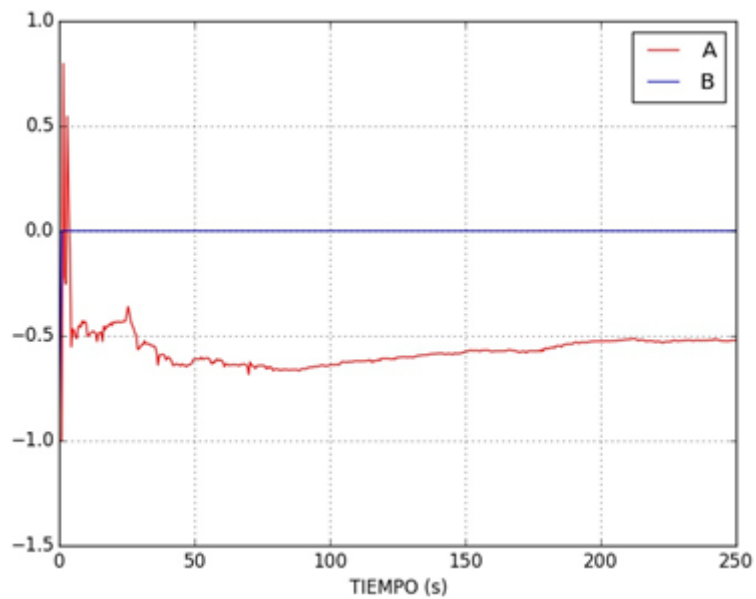


Figura 48. Parámetros del sistema en G1

El algoritmo implementado estima los parámetros para un sistema discreto de primer orden representado por el modelo DARMA (45). En las Figuras 48, 49 y 50 las curvas A y B representan los coeficientes de los polinomios la ecuación (46) respectivamente, que forman un sistema para cada una de las dinámicas de gases donde se ubicó un sensor.

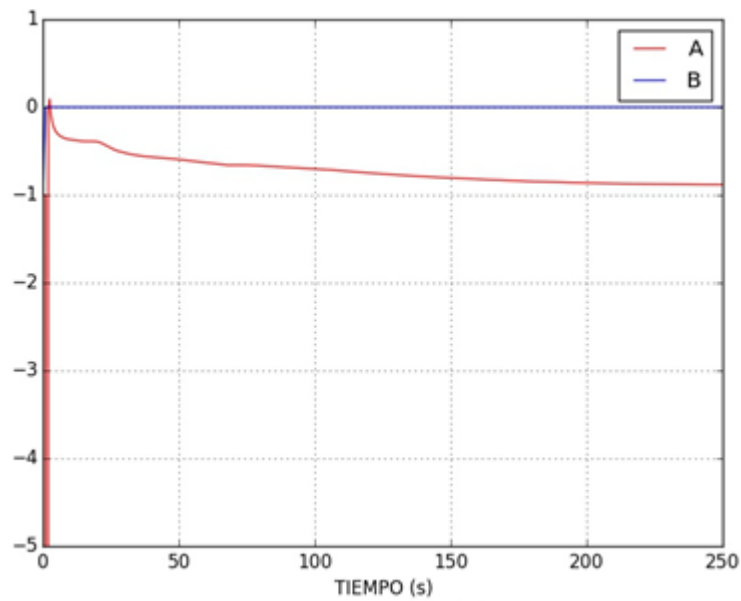


Figura 49. Parámetros del sistema en G2

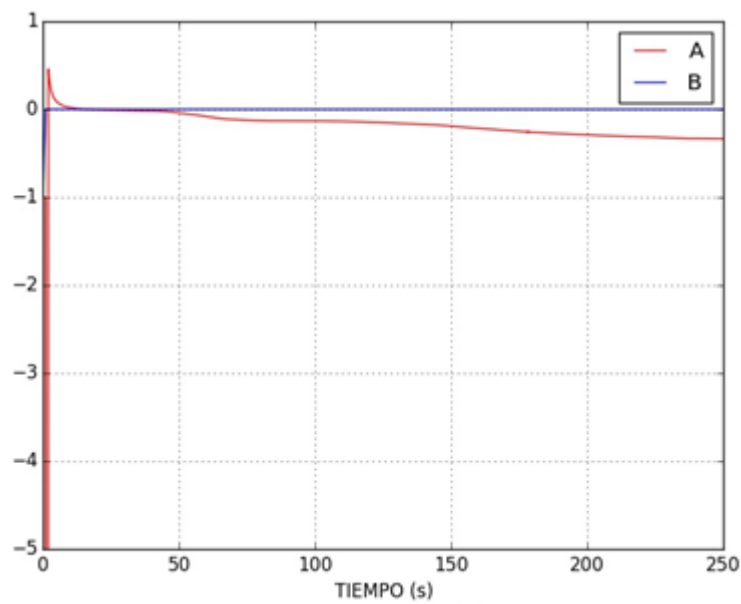


Figura 50. Parámetros del sistema en G3

Las perturbaciones en el frente izquierdo no alcanza el mismo nivel de concentración alcanzado cuando el sistema no tenía control, el humo alcanza el frente central a causa que se necesita un volumen de humo mucho mayor a la capacidad del frente izquierdo del prototipo para alcanzar el nivel observado en la Figura 45. Esta limitación permite observar el efecto del control sobre las

concentraciones en cada frente de forma paralela y el comportamiento de los flujos del prototipo.

Los algoritmos de estimación convergen más rápido cuando el sistema sufre perturbaciones alrededor del punto de trabajo y este tiene un comportamiento dinámico más definido como se observa en las Figuras (48, 49 y 50).

La segunda prueba de la estrategia de control se realiza generando perturbaciones en el frente central, sobre el que actúa directamente una estrategia de control usando M2 como actuador.

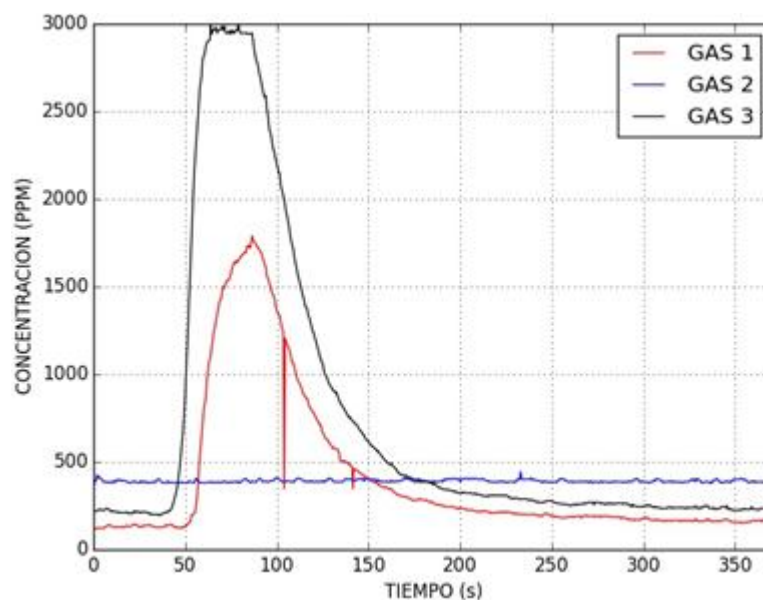


Figura 51. Dinámica de gases ante perturbación por frente central

En la Figura 51 se observa el comportamiento del sistema durante y después de la perturbación y circulación de gas por la rama 1. El comportamiento de las señales de control (Figura 52) y flujos (Figura 53) son similares, porque los observadores usados para generarlas son lineales y se calculan a partir de la misma señal.

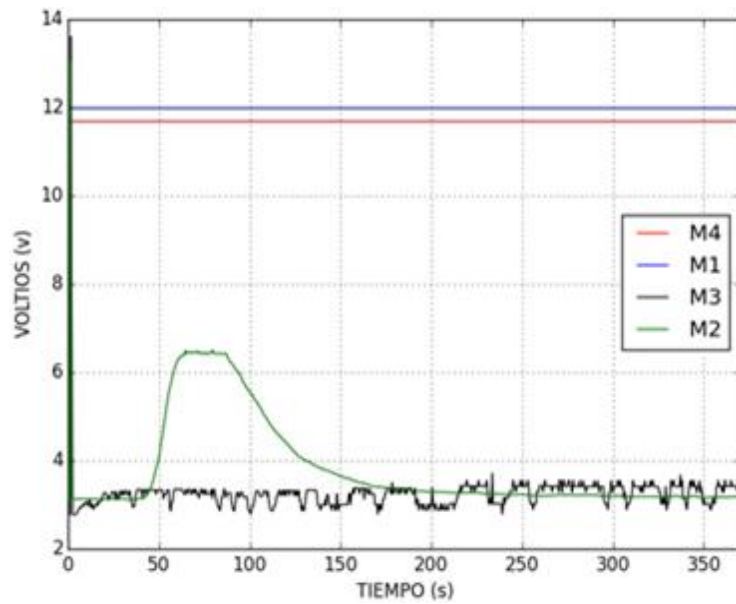


Figura 52. Señales de control para perturbaciones por frente central

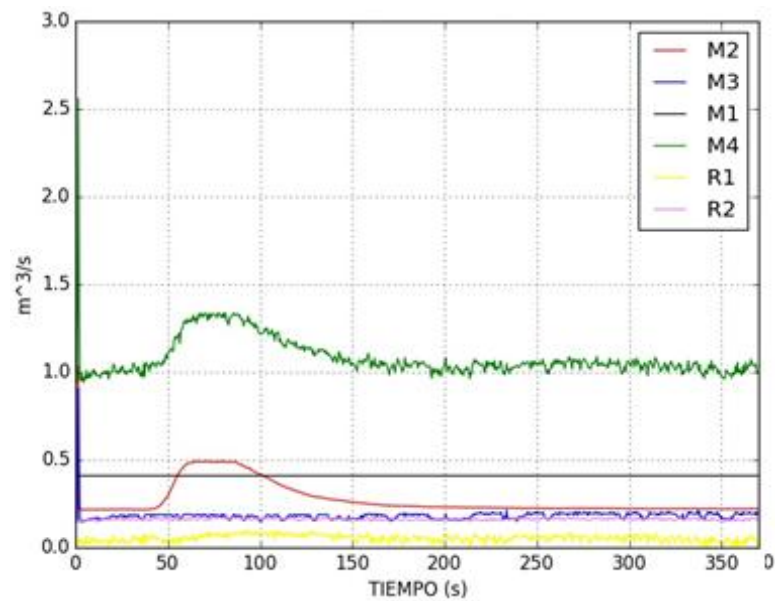


Figura 53. Comportamiento de los flujos

El algoritmo implementado estima los parámetros para un sistema discreto de primer orden representado por el modelo DARMA (45). En las Figuras 54, 55 y 56 las curvas A y B representan los coeficientes de los polinomios la ecuación (46) respectivamente, que forman un sistema para cada una de las dinámicas de gases donde se ubicó un sensor.

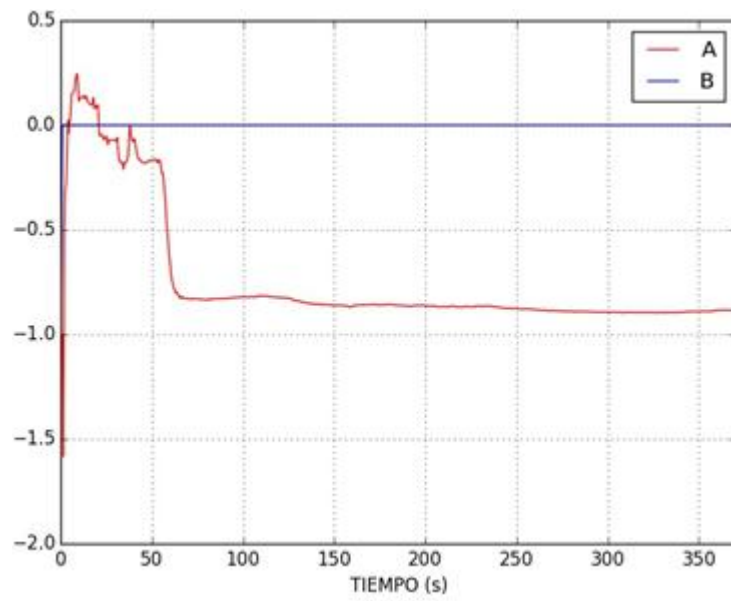


Figura 54. Parámetros del sistema en G1

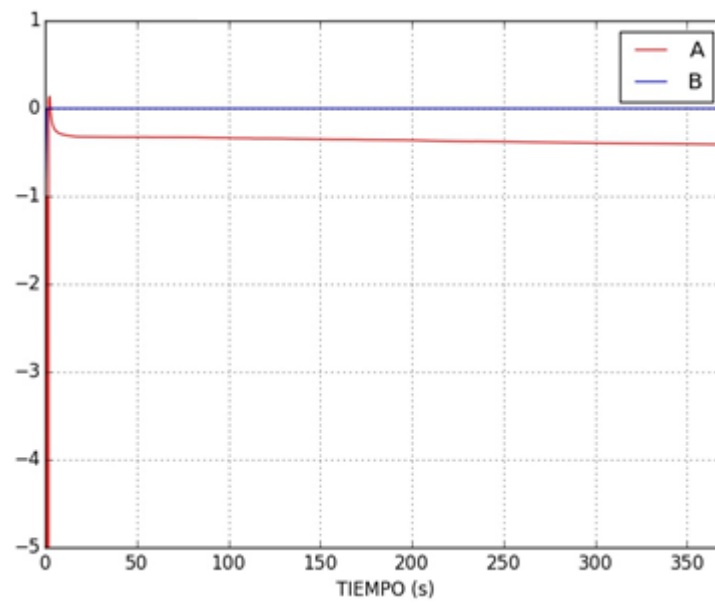


Figura 55. Parámetros del sistema en G2

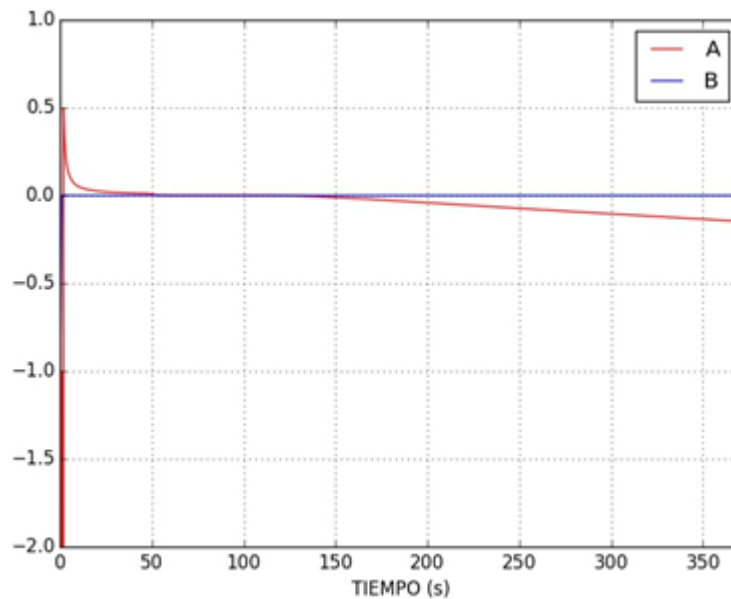


Figura 56. Parámetros del sistema en G3

En esta prueba no se produce intercambio de humo entre los diferentes frentes, por el mayor volumen del frente central y las dos ramas para la evacuación del humo, lo que se observa por el incremento de la concentración en G1 (Figura 51). En las pruebas los algoritmos de estimación de parámetros de los sistemas de gas convergen más rápidamente con la presencia de gas (Figuras 54, 55 y 56), la convergencia permite el cálculo correcto de la ley de control, sin generarse sobre picos excesivos como ocurre cuando se inicializan los algoritmos, estos efectos se observan en las Figuras (52 y 53).

5.5 CONTROLADOR MUERTE SUBITA (DEAD-BEAT)

Para la prueba de esta estrategia de control se generan perturbaciones en cada uno de los frentes inyectando humo, hasta alcanzar un valor cercano de PPM al de las curvas de las Figuras 43 y 44. Alcanzar este nivel en las perturbaciones se deja de inyectar humo, para poder observar cómo cambia la dinámica del sistema en lazo cerrado.

Después de cada prueba se generan las gráficas en las que se observa el comportamiento de la concentración de gas, niveles de voltaje de las señales control, los diferentes flujos y la convergencia de los algoritmos de estimación de parámetros de los sistemas de concentración de los gases.

La primera prueba de la estrategia de control se realiza generando la perturbación en el frente izquierdo, con la que se debe observar cambios en la dinámica de los flujos y gas.

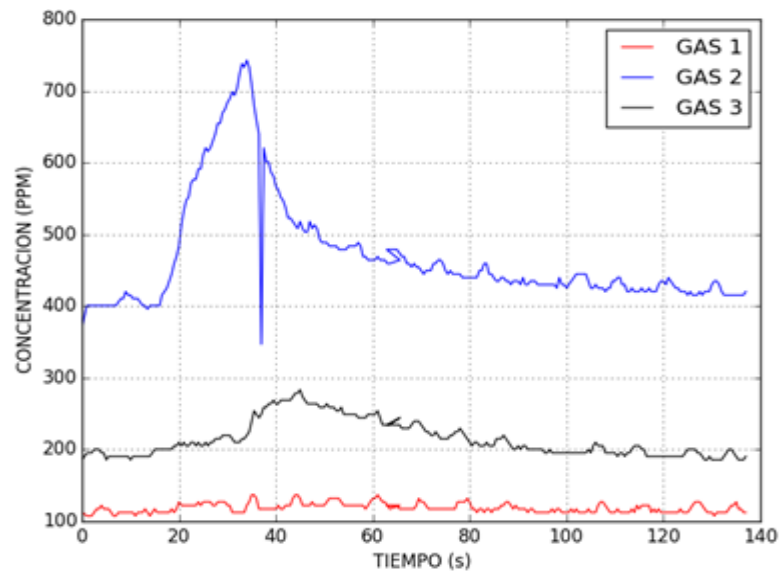


Figura 57. Dinámica de gases ante perturbación por frente izquierdo

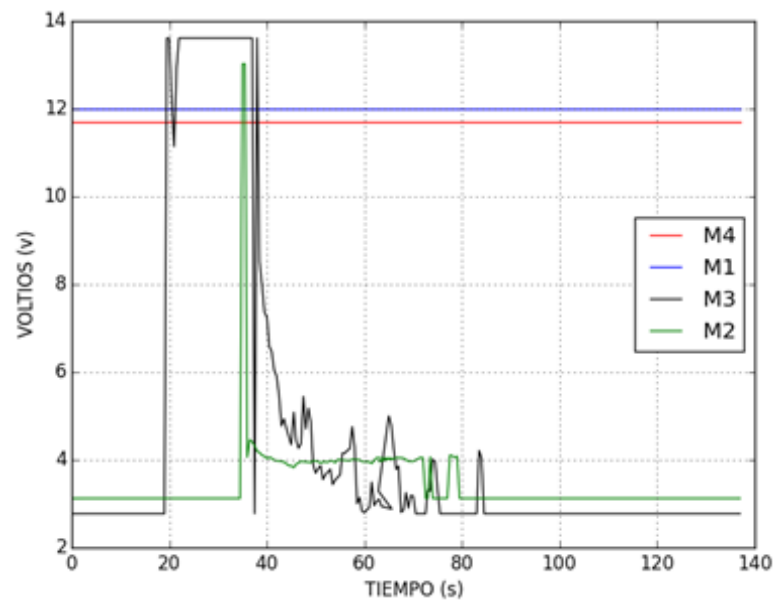


Figura 58. Señales de control para perturbaciones por frente izquierdo

En la Figura 57 se observa el comportamiento del sistema durante y después de la perturbación. El comportamiento de las señales de control (Figura 58) y flujos (Figura 59) son similares, porque los observadores usados para generarlas son lineales y se calculan a partir de la misma señal, pero cada uno tiene límites diferentes para la respuesta máxima.

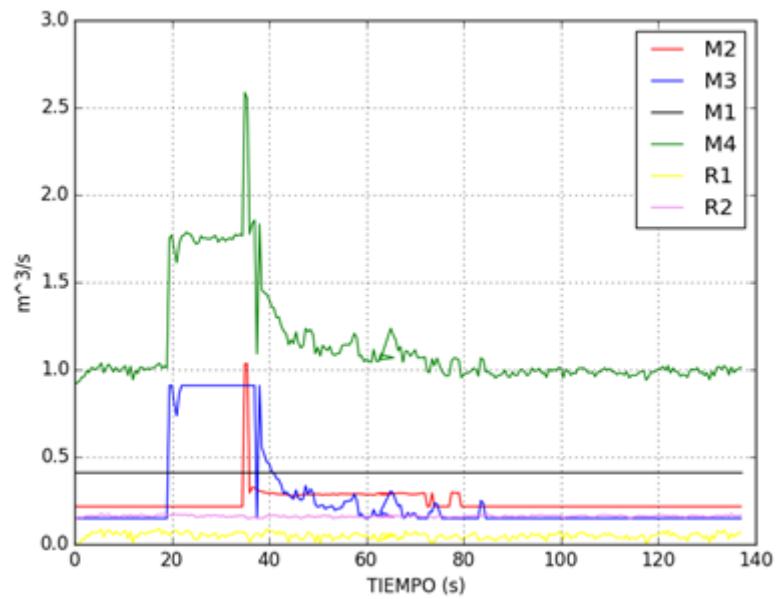


Figura 59. Comportamiento de los flujos

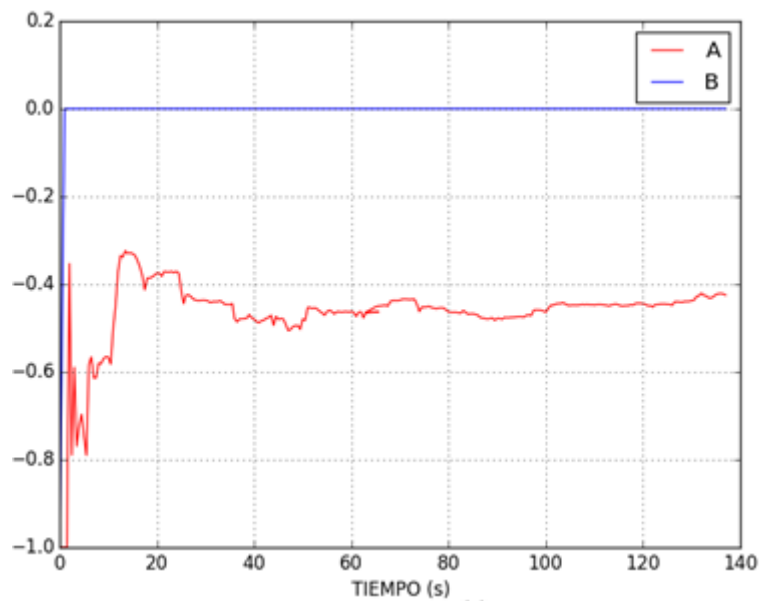


Figura 60. Parámetros del sistema en G1

El algoritmo implementado estima los parámetros para un sistema discreto de primer orden representado por el modelo DARMA (45). En las Figuras 60, 61 y 62 las curvas A y B representan los coeficientes de los polinomios la ecuación (46) respectivamente, que forman un sistema para cada una de las dinámicas de gases donde se ubicó un sensor.

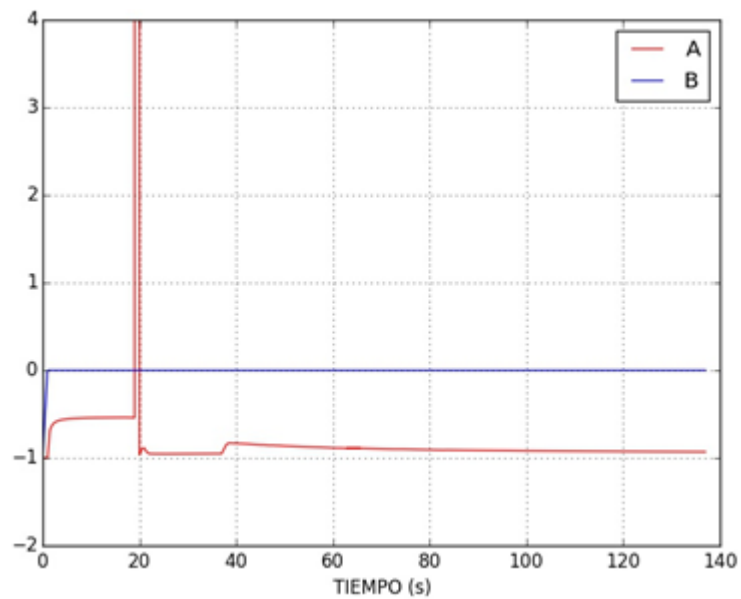


Figura 61. Parámetros del sistema en G2

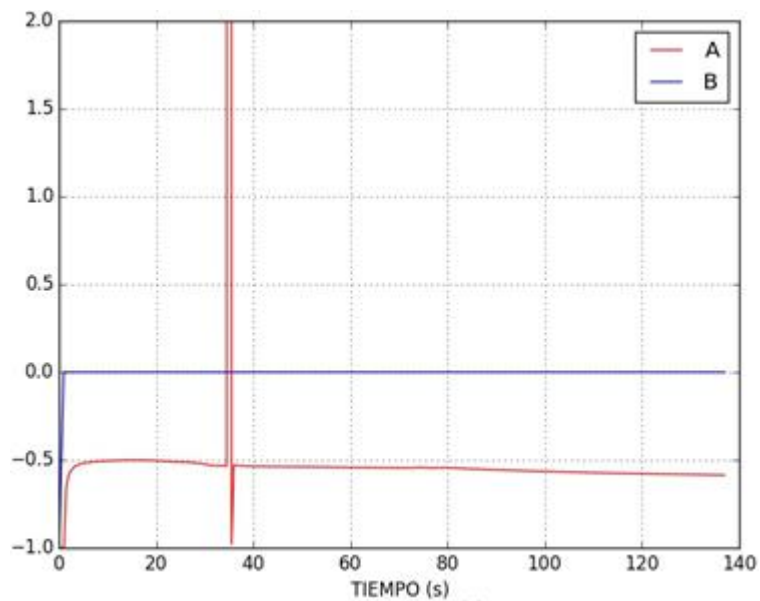


Figura 62. Parámetros del sistema en G3

Las perturbaciones en el frente izquierdo no alcanza el mismo nivel de concentración alcanzado cuando el sistema no tenía control, el humo alcanza el frente central a causa que se necesita un volumen de humo mucho mayor a la capacidad del frente izquierdo del prototipo para alcanzar el nivel observado en la Figura 57. Esta limitación permite observar el efecto del control sobre las

concentraciones en cada frente de forma paralela y el comportamiento de los flujos del prototipo.

En las pruebas de la estrategia de control, los algoritmos de estimación (Figuras 60, 61 y 62) sufren un cambio abrupto en el momento que la señal de control cambia (Figuras 58 y 59) por la detección de presencia de gas (Figura 57). Generando turbulencias en los nodos por los cambios abruptos de presión, lo cuales se estabilizan al estabilizarse la señal de control.

La segunda prueba de la estrategia de control se realiza generando perturbaciones en el frente central, sobre el que actúa directamente una estrategia de control usando M2 como actuador.

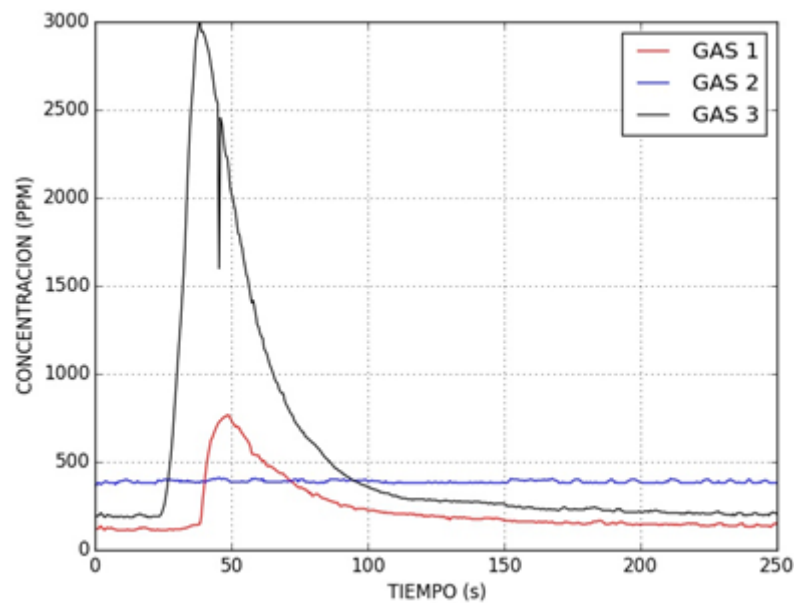


Figura 63. Dinámica de gases ante perturbación por frente central

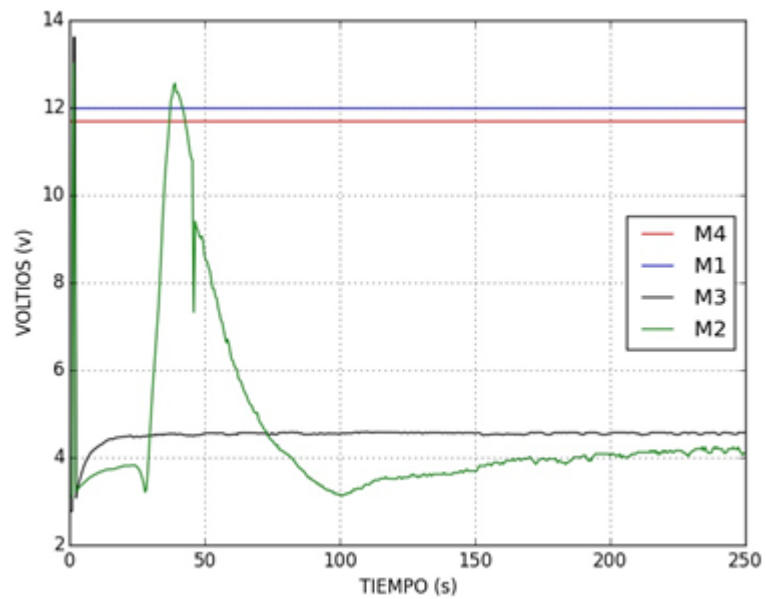


Figura 64. Señales de control para perturbaciones por frente central

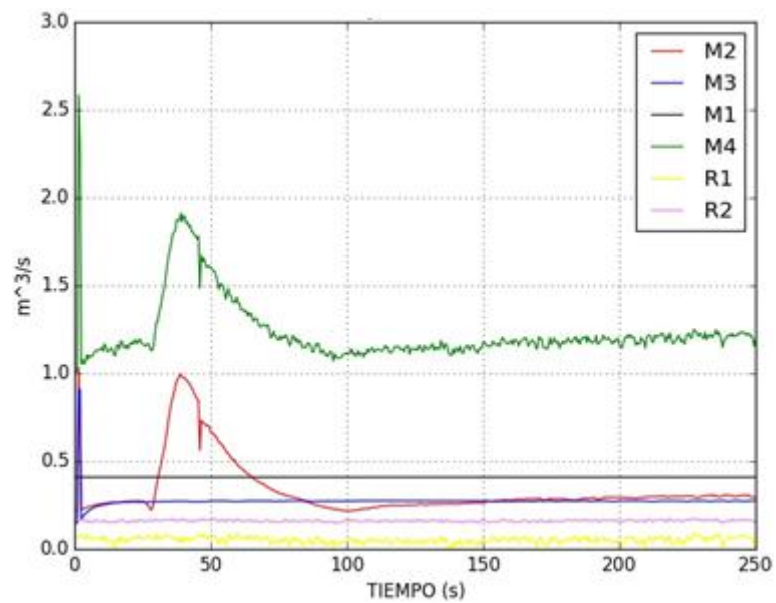


Figura 65. Comportamiento de los flujos

En la Figura 63 se observa el comportamiento del sistema durante y después de la perturbación. El comportamiento de las señales de control (Figura 64) y flujos (Figura 64) son similares, porque los observadores usados para generarlas son lineales y se calculan a partir de la misma señal, pero cada uno tiene límites diferentes para la respuesta máxima.

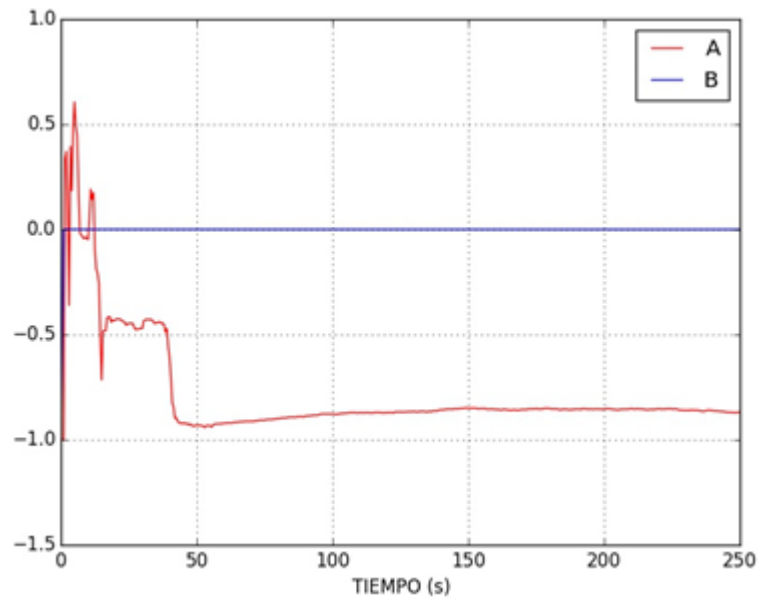


Figura 66. Parámetros del sistema en G1

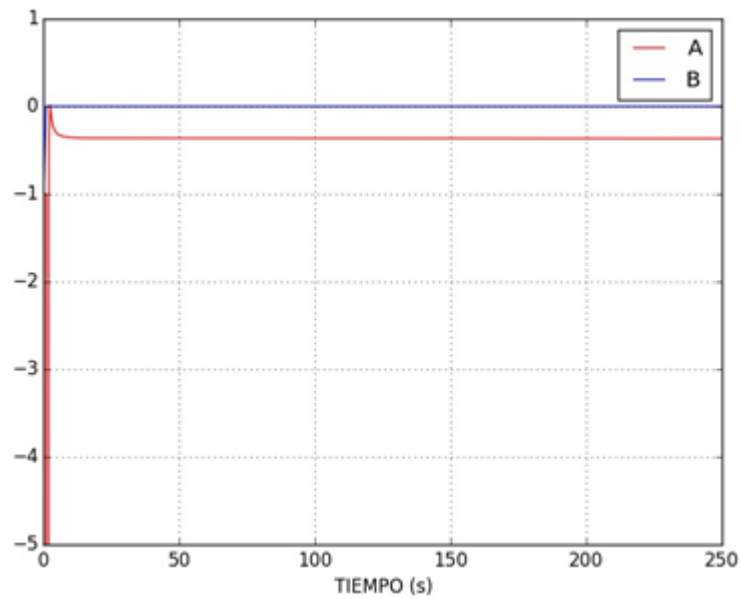


Figura 67. Parámetros del sistema en G2

El algoritmo implementado estima los parámetros para un sistema discreto de primer orden representado por el modelo DARMA (45). En las Figuras 66, 67 y 68 las curvas A y B representan los coeficientes de los polinomios la ecuación (46) respectivamente, que forman un sistema para cada una de las dinámicas de gases donde se ubicó un sensor.

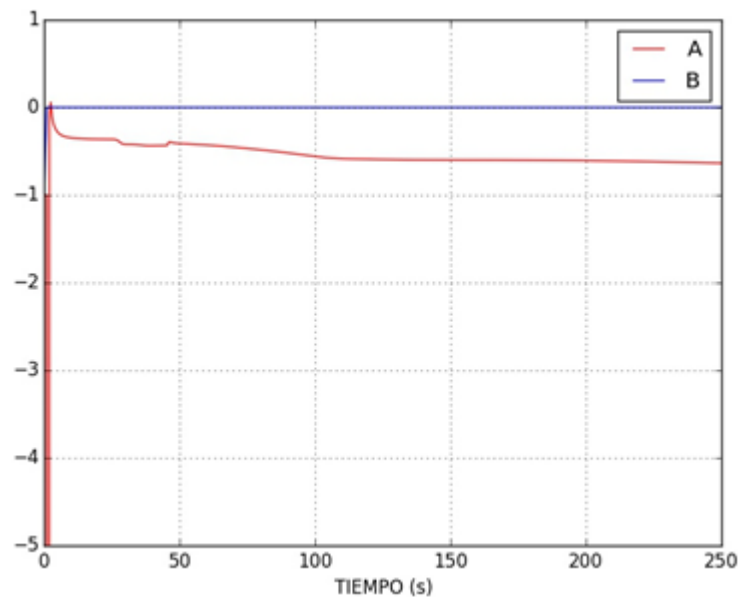


Figura 68. Parámetros del sistema en G3

Esta prueba no genera cambios abruptos en los estimadores (Figuras 66, 67 y 68), las señales de control (Figuras 64 y 65) tiene un comportamiento más estable que en la prueba anterior y el humo se evacua de manera más rápida sin alcanzar el otro frente de trabajo (Figura 63).

El cambio en las diferentes señales se da por las diferencias de dimensiones de las galerías en las que se están produciendo las perturbaciones, afectando las dinámicas de gas y las leyes de control que se generen no son excesivas.

5.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la siguiente tabla se realiza la comparación de los tiempos de establecimiento de los sistemas G1, G2 y G3 obtenidos al realizar las pruebas sin control en el punto de equilibrio (Figuras 43 y 44), con el controlador de asignación de polos (Figuras 45 y 51) y el controlador de muerte súbita (Figuras 57 y 63), de igual forma los sobre-picos de los voltajes que se presentan en cada prueba sin control (Figura 38) y con los controladores (Figuras 46, 52, 58 y 64).

	Sin control en el punto de equilibrio	Controlador de asignación de polos	Controlador de muerte súbita
Frente izquierdo	320 s	130 s	70 s
frente central	550 s	170 s	100 s
Sobre-pico frente izquierdo	2.8 V	8.5 V	13.8 V
Sobre-pico frente central	3 V	6.5 V	12.3 V

Las señales de control en cada estrategia tienen comportamientos diferentes que generan sobre picos y en casos ruido. Lo que puede producir daños en los actuadores y driver por los picos de corriente necesarios para seguir la señal de control.

El efecto del control sobre el cambio del punto de equilibrio se observa sobre los diferentes caudales, que responden a los cambios de presión producido por los actuadores. Cuando se producen cambios abruptos de las presiones se producen turbulencias en las cercanías de los actuadores.

La implementación de los controladores tiene limitantes por las características de los actuadores y la señal de control que se puede aplicar a estos. Por lo que se desarrolla una estrategia para limitar la señal aplica a los actuadores afectando el desempeño del control.

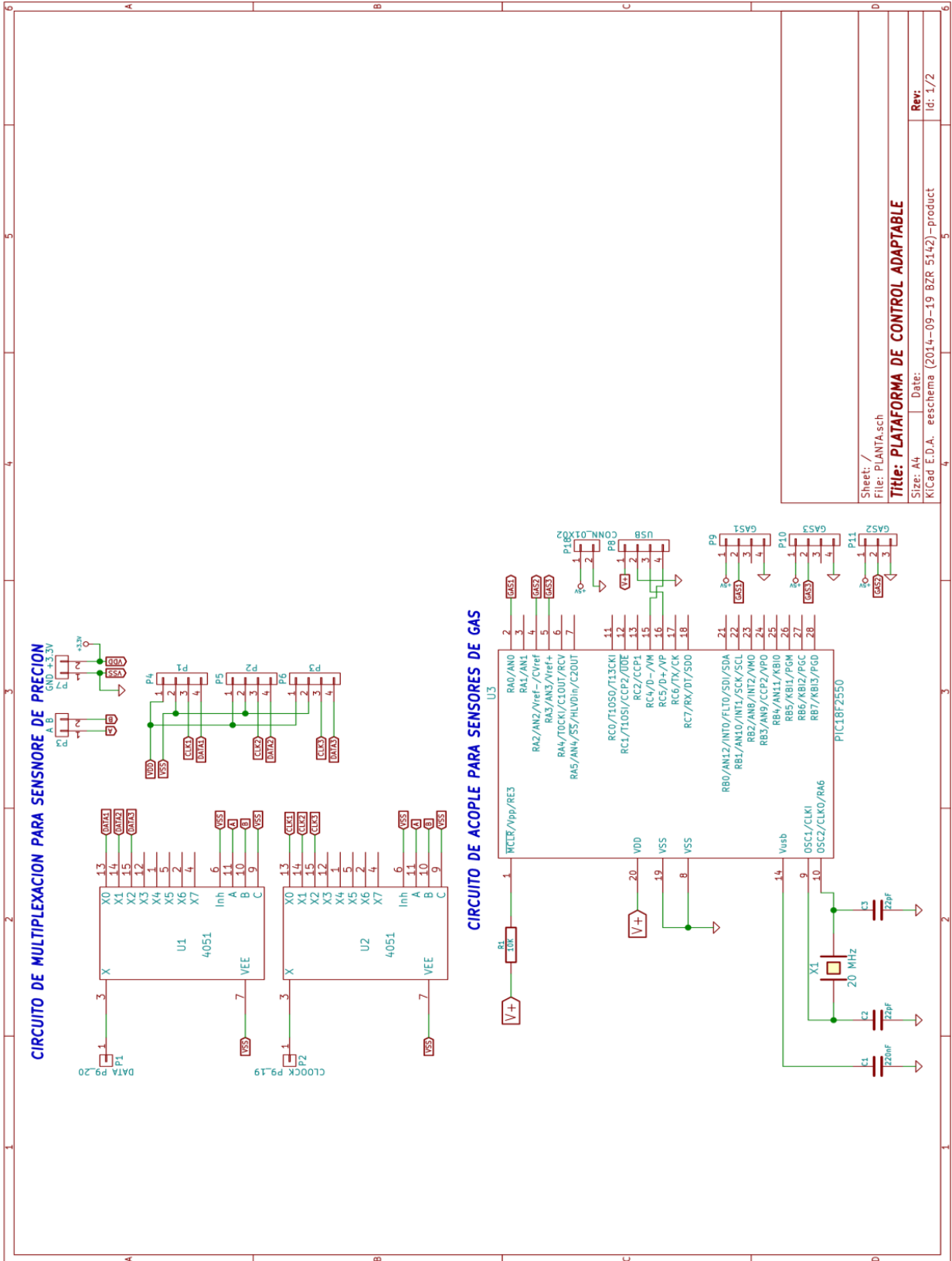
CONCLUSIONES

- El funcionamiento de las estrategias de control depende de la selección adecuada de los sensores de tal modo que las variables a medir sean perceptibles y sus valores no queden fuera del rango del sensor al medir las variaciones de presión las cuales son mínimas.
- El intercambio de datos, se realiza por Ethernet para aprovechar su ancho de banda y evitar bloqueos en la interfaz gráfica que a su vez afecte los algoritmos de estimación y control, como ocurre al usar otros protocolos de comunicación.
- Las estrategias de control aplicadas al prototipo ofrecen mejoras notables en tiempo de respuesta en la evacuación de los gases en las galerías. Para concluir sobre el desempeño de los controladores y realizar una comparación se debe observar además de los tiempos de establecimiento y los tamaños de las señales de control, los efectos de retroalimentación de los gases en las galerías los cuales se presentan cuando hay cambios bruscos en la velocidad de los ventiladores que afectan las presiones en las ramas del prototipo.
- Las leyes de control se desestabilizan cuando los algoritmos de estimación no convergen a valores aproximados a los verdaderos de los sistemas. Porque se trata de obligar al sistema a dar una respuesta a partir de una señal de control calculada con parámetros erróneos.
- En el punto de trabajo que se estableció para los ventiladores no se generaron turbulencias en las ramas y nodos del prototipo. Las turbulencias se produjeron cuando los ventiladores se aceleraron abruptamente, provocando caídas de presiones.
- Las diferentes pruebas permitieron observar el desempeño del prototipo y plantear algunas mejoras en su construcción con miras a una mejor aproximación a la realidad.
- Las limitaciones de los actuadores para seguir la señal de control, limita la capacidad de respuesta de los controladores ante perturbaciones,

produciendo que el tiempo de establecimiento del sistema se ha mayor al que se tendría si las turbinas siguieran fiel mente la señal de control.

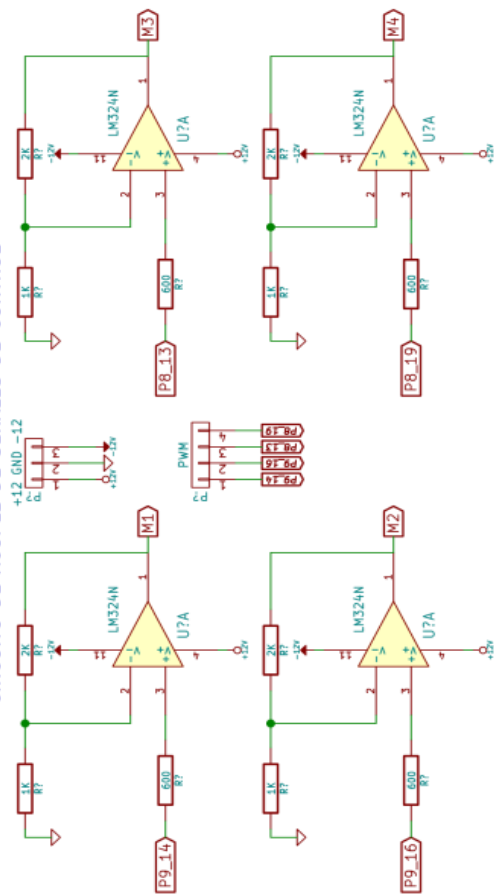
- La convergencia de los algoritmos de estimación a valores de parámetros más cercanos a los valores reales de los sistemas, es mejor cuando el sistema tiene un comportamiento dinámico marcado y se hace perceptible su comportamiento y punto de establecimiento.

ANEXOS

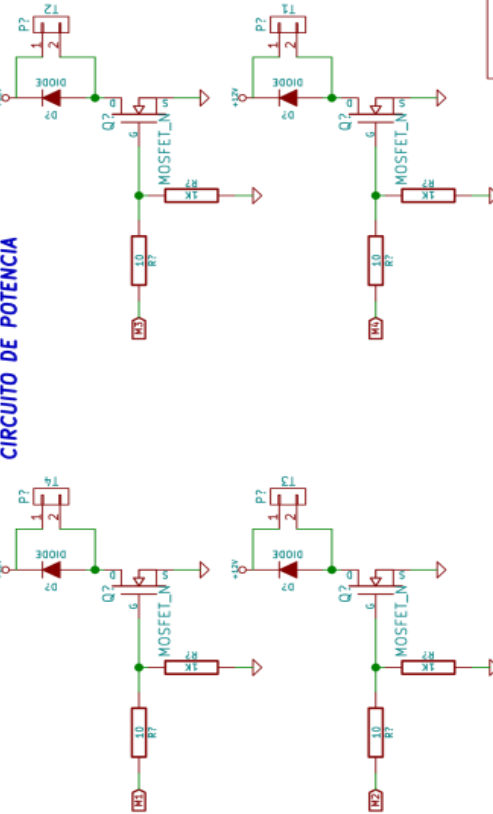


REFERENCIAS

CIRCUITO DE ACOPLE DE SEÑALES DE CONTROL



CIRCUITO DE POTENCIA



Sheet: /Sheet54E8F7F/
File: file54E8F7F.sch

Title: PLATAFORMA DE CONTROL ADAPTABLE

Size: A4 Date: 22 feb 2015
Kicad E.D.A. eeschema (2014-09-19 BZR 5142)-product

Rev:
Id: 2/2

- [1] R. Martínez, A. C., & Caro, "Fuentes energéticas. In La Nueva Geopolítica de la Energía," *Inst. Español Estud. Estratégicos.*, pp. 21–34, 2010.
- [2] C. Camilo, J. Mart, and M. Escobar, "Caracterización de sistemas de ventilación en minería subterránea characterization of ventilation systems in underground mines," pp. 73–86, 2011.
- [3] V. Barco, "DECRETO NUMERO 1335 DE 1987," no. Julio 15, p. 49, 1987.
- [4] Y. Hu, O. I. Koroleva, and M. Krstić, "Nonlinear control of mine ventilation networks," *Syst. Control Lett.*, vol. 49, no. 4, pp. 239–254, Jul. 2003.
- [5] E. Witrant and K. H. Johansson, "Air flow modeling in deep wells: application to mining ventilation," pp. 845–850, 2008.
- [6] Z. Miao, Z. Wang, and W. Lan, "Reliability evaluation of mine ventilation systems based on multi-state system theory," *Ieee Icca 2010*, pp. 1092–1097, Jun. 2010.
- [7] G. E. Du Plessis, L. Liebenberg, and E. H. Mathews, "The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems," *Appl. Energy*, vol. 111, pp. 16–27, Nov. 2013.
- [8] W. Lian-jiang, "Topology theory of mine ventilation network," *Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 354–360, Sep. 2009.
- [9] SENA, DEPARTAMENTO DE TOPOGRAFIA, and C. MINERO, "ANEXO SISTEMA DE VENTILACION." SOGAMOSO - MORCA, p. 1, 2013.
- [10] Minebea, "BG1203 (Ø120 X 32L)," 2014. [Online]. Available: <http://www.nmbtc.com/pdf/blowerfans/bg1203.pdf>.
- [11] R. Tem, U. Tem, and S. Tem, "Technical data mq-2 gas sensor," 2014. [Online]. Available: <http://www.seeedstudio.com/depot/datasheet/MQ-2.pdf>.
- [12] B. Sensortec, "BMP085 digital pressure sensor," 2014. [Online]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/BST-BMP085-DS000-05.pdf>.
- [13] Minebea, "08020SA (80 X 20L)," 2014. [Online]. Available: <http://www.nmbtc.com/content/pdfs/08020SA.pdf>.

- [14] Minebea, "BG0903 (Ø95 X 33L)," 2014. [Online]. Available: <http://www.nmbtc.com/pdf/blowerfans/bg0903.pdf>.
- [15] Beagleboard, "BeagleBone Rev A6 System Reference Manual," 2014. [Online]. Available: http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE_SRM.pdf.
- [16] Y. Cardona, R. Blan, and André Gentric, "PROYECTO PINGÜINO," 2014. [Online]. Available: <http://www.pinguino.cc/>.
- [17] Y. Cardona, R. Blan, and André Gentric, "PINGUINO WIKI," 2014. [Online]. Available: http://wiki.pinguino.cc/index.php/Main_Page.
- [18] D. Svoboda, *Circuitos Eléctricos*, Sexta edic. 2006, p. 609.
- [19] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, TERCERA ED. MEXICO: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, 2003, pp. 710–711.
- [20] H. Zhu, Z. Song, Y. Hao, and S. Feng, "Application of Simulink Simulation for Theoretical Investigation of Nonlinear Variation of Airflow in Ventilation Network," *Procedia Eng.*, vol. 43, pp. 431–436, Jan. 2012.
- [21] R. Iserman and M. Münchhof, *Identification of Dynamic Systems*. New York, 2011, p. 732.
- [22] S. Mauricio, "Estimacion de parametros en tiempo discreto," *Control Av.*, p. 32, 2013.
- [23] D. I. The and B. Pearson, "Least Squares.," pp. 1–4, 2003.
- [24] D. Rodríguez Ramírez and C. Bordóns Alba, "Apuntes de ingeniería de control," p. 174, 2005.
- [25] D. Než, "Dead-Beat Control for Polynomial Systems Dead-Beat Control for Polynomial Systems Dragan Než," no. August, p. 319, 1996.
- [26] D. Nesic, I. M. Y. Mareels, G. Bastin, and R. Mahony, "Output Dead Beat Control for a Class of Planar Polynomial Systems," *SIAM J. Control Optim.*, vol. 36, no. 1, pp. 253–272, 1998.
- [27] J. M. Salamanca, "Estudio sobre control adaptable," Distrital Francisco Jose de Caldas, 1993.
- [28] "PYTHON," 2014. [Online]. Available: <https://www.python.org/>.

- [29] "Numpy," 2014. [Online]. Available: <http://www.numpy.org/>.
- [30] "Matplotlib," 2014. [Online]. Available: <http://matplotlib.org/>.
- [31] "pylab," 2014. [Online]. Available: <http://wiki.scipy.org/PyLab>.
- [32] "wxPython," 2014. [Online]. Available: <http://www.wxpython.org/>.
- [33] "project qt," 2014. [Online]. Available: <http://qt-project.org/>.
- [34] M. Lopez Garcia, "MEDICION DE CAUDAL," 2007. [Online]. Available: http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/Medicion_de_Caudal.pdf.